

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Analýza přepětí v průmyslových sítích

Overvoltage study in electrical industrial networks

2017

Bc. Vojtěch Leskovský

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vojtěch Leskovský

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Analýza přepětí v průmyslových sítích
Overvoltage Study in Electrical Industrial Networks

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Druhy přepětí a příčiny jejich vzniku
2. Problematika atmosférických přepětí
3. Koordinace izolace dle IEC 60071
4. Principy a pravidla při modelování přepětí
5. Aplikace koordinace izolace na reálnou průmyslovou síť

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Přepětí v elektroenergetických soustavách, Hasman T. ČVUT, 1997
2. IEC 60071 – Insulation coordination
3. IEC 62305 – Protection against lightning
4. IEC 60099 – Surge arresters
5. Další literatura podle pokynu vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum: 15. 4. 2017


.....
podpis diplomanta

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. a Ing. Břetislavu Stachovi, Ph.D. za jejich rady a čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky. V neposlední řadě také děkuji své rodině, která mne po celou dobu studia na vysoké škole podporovala.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou přepětí v průmyslových sítích a jeho analýz. Objektem zkoumání byl rozbor přepětí na reálné síti, která leží v Austrálii. V praxi zkoumáme typy přepětí, která mohou nastat v síti, a navrhujeme ochranná opatření proti jeho následkům. Všechno v souladu s požadavky na koordinaci izolace.

Předmětem byl postup podle normy ČSN EN 60071 a následná simulace v programu ATP. Zjistili jsme, že navržená ochranná opatření ve skutečné síti odpovídají požadavkům a postupu normy. Koordinace izolace je splněna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přepětí, Blesk, Bleskojistka, ATP-EMTP, Koordinace izolace.

ABSTRACT

The Diploma thesis deals with problems of overvoltage in industrial networks and their analysis. Object of the study was to analyze the overvoltage on a real network, which is located in Australia. In the thesis we investigate kinds of overvoltage that may occur in the network, and propose a protection measures to against the consequences. All according the requirements for insulation coordination.

Subject to the procedure was according to Standart EN 60071 and following of simulation in software ATP. We discovered fact that the proposed safeguards in the real network correspond to the requirements and procedure to standards. Insulation coordination is fulfilled.

KEYWORDS

Overvoltage, Lightning, Surge Arrester, ATP-EMTP, Insulation coordination study.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 Druhy přepětí a příčiny jejich vzniku	13
2.1 Definice přepětí	14
2.2 Druhy přepětí	16
2.3 Spínací přepětí	19
2.3.3 Přepětí při zemních spojeních v trojfázových soustavách	19
2.3.4 Přepětí při vypínání zkratů	19
2.3.5 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů	19
2.3.6 Přepětí při spínání kapacitních proudů	19
2.4 Výdržné napětí	20
3 Problematika atmosférických přepětí	21
3.1 Vznik atmosférických přepětí	22
3.2 Účinky atmosférického výboje	22
3.3 Kritéria pro ochranu před bleskovým proudem	23
3.4 Úder blesku do vedení, nebo jeho blízkosti	25
3.4.1 Přímý úder do fázového vodiče	25
3.4.2 Údery do stínicích vodičů nebo stožárů, zpětné přeskoky	25
3.5 Koordinace izolace pro atmosférická přepětí	26
3.6 Distribuční vedení	27
3.7 Přenosová vedení	27
3.8 Výpočet bleskového proudu	27
4 Koordinace izolace dle IEC 60071	28
4.1 Odolnost izolačních systémů	29
4.2 Určování odolnosti izolačních systémů	29
4.3 Ochranná hladina	30
4.4 Základní postupy při koordinaci izolace	30
4.5 Postup koordinace izolace	31
4.5.1 Deterministická metoda	33
4.5.2 Statistická metoda	33
4.6 Určení reprezentativních napětí a přepětí (U_p)	34
4.7 Stanovení koordinačních výdržných napětí (U_{cw})	35
4.8 Stanovení požadovaných výdržných napětí (U_{rw})	35
4.9 Rozsahy nejvyšších napětí pro zařízení	35

4.10	Zvláštní úvahy pro venkovní vedení	36
4.10.1	Koordinace izolace pro provozní napětí a dočasná přepětí	36
4.10.2	Koordinace izolace pro přepětí s pomalým čelem	36
4.10.3	Přepětí při zemním spojení	36
4.10.4	Přepětí při zapínání a opětném zapínání	37
5	Principy a pravidla při modelování přepětí	38
5.1	ATP-EMTP	38
5.1.1	Zdroj	38
5.1.2	Venkovní vedení a jejich modely	39
5.1.3	Bleskojistka	40
5.1.4	Bleskový proud	40
5.1.5	Transformátor	42
5.1.6	Nastavení simulace	42
5.1.7	Výsledek modelování	42
6	Aplikace koordinace izolace a stanovení reprezentativních přepětí na reálnou síť	43
6.1	Stanovení reprezentativních přepětí U_{rp}	43
6.1.1	Dočasná přepětí	44
6.1.2	Přepětí s pomalým čelem	45
6.1.3	Přepětí s rychlým čelem	46
6.1.4	Simulace přepětí s rychlým čelem	47
6.2.1	Simulace na omezovači přepětí	49
6.2.2	Vliv délky přívodu a a b	51
7	Závěr	52
8	Seznam použité a citované literatury	53

Seznam zkratk a symbolů

ATP-EMTP	Alternative Transients Program – elektroMagnetic Transients Program
BIL	základní izolační hladina
CELDN	Central European Lightning Detection Network
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci
ČSN	Česká technická norma
EES	Elektroenergetická soustava
EUCLID	European Cooperation for Lightning Detection
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
LEMP	Lightning electromagnetic Pulse
PCC	Společný bod napájení
LPL	Hladina ochrany před bleskem
a	přívod k transformátoru [m]
b	přívod k omezovači [m]
d	krajní vzdálenost k zemnicímu lanu [m]
H	průměrná výška zemnicího lana [m]
I_{imp}	hodnota bleskového proudu [A]
I_n	jmenovitý elektrický proud [A]
I_s	nejvyšší vypočtený bleskový proud
K_0	orografický koeficient
K_c	činitel koordinace
L	Ochranná vzdálenost [m]
L_a	délka venkovního vedení [m]
L_{sp}	rozpětí pole [m]
n	počet venkovních vedení
N_d	četnost přímých úderů do vedení
N_g	hustota výskytu blesku
O_1	efektivní počátek
p.j.	poměrná jednotka
P_1	zátěž [W]
P_w	pravděpodobnost přeskočení [%]
Q_1	reaktance zátěže [Var]
R_a	přijatelná četnost poruch
S	strmost atmosférického přepětí
S_{sc}	minimální zkratový výkon [VA]
T_1	dobu čela [s]
T_2	dobu půltýlu [s]
T_d	hodnota dle izokeraunické mapy
U_c	hodnota přepětíové ochrany [V]
U_{cw}	koordinační výdržné napětí [V]
ue_2	2 % hodnota přepětí fáze zem [V]

u_{et}	hodnota fáze zem při useknutí [V]
U_m	maximální napětí v síti [V]
U_{max}	maximální hodnota napětí [V]
U_n	jmenovitá hodnota napětí [V]
up_2	2 % hodnota přepětí fáze – fáze [V]
U_{pl}	ochranná hladina svodiče přepětí při atmosférickém impulzu [V]
U_{ps}	ochranná hladina svodiče přepětí při spínacím impulzu [V]
upt	hodnota fáze – fáze při useknutí [V]
U_r	reakční napětí omezovače přepětí [V]
U_{tp}	vrcholová hodnota reprezentativního přepětí [V]
U_{rw}	požadované výdržné napětí [V]
U_w	normalizované výdržné napětí [V]
x	vzdálenost, kterou musí přepět'ová vlna urazit [m]
y	průměrná výška fázového vodiče [m]

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Typická napětí a doby jejich trvání ^[11]	14
Obrázek 2-2 Trvalé přepětí ^[4]	16
Obrázek 2-3 Dočasné přepětí ^[4]	16
Obrázek 2-4 Přechodné přepětí s dlouhým čelem ^[4]	17
Obrázek 2-5 Přechodné přepětí s krátkým čelem ^[4]	17
Obrázek 2-6 Přechodné přepětí s velmi rychlým čelem ^[4]	17
Obrázek 2-7 Časový rámec přechodných dějů v ES ^[8]	18
Obrázek 3-1 Bouřka	21
Obrázek 3-2 Parametry bleskového proudu ^[16]	23
Obrázek 3-3 Parametry bleskového proudu	24
Obrázek 3-4 Přímé úder blesků do vedení (a) přímý zásah do fázového vodiče, b) přímý zásah do zemnicího lana, c) přímý zásah do uzemněné části stožáru)	25
Obrázek 4-1 Rázová charakteristika ^[4]	28
Obrázek 4-2 Rázová charakteristika izolátoru ^[4]	29
Obrázek 4-3 Diagram pro stanovení jmenovitých nebo normalizovaných izolačních hladin ^[10]	32
Obrázek 5-1 Model uspořádání vodičů	39
Obrázek 5-2 Model v ATP	39
Obrázek 5-3 Model izolátoru	39
Obrázek 5-4 Ochranný prostor	41
Obrázek 5-5 Bleskový proud	41
Obrázek 5-6 Nastavení transformátoru	42
Obrázek 5-7 Schéma sítě v ATP	42
Obrázek 6-1 Zemní spojení	44
Obrázek 6-2 Zapnutí vedení	45
Obrázek 6-3 Zapojení omezovače přepětí	47
Obrázek 6-4 Přepětí v místě úderu	48
Obrázek 6-5 Napětí na omezovači přepětí	49
Obrázek 6-6 Proud na omezovači přepětí	49
Obrázek 6-7 Napětí na primární straně transformátoru	50
Obrázek 6-8 Souhrn simulace a) místo úderu b) napětí na omezovači přepětí c) napětí na transformátoru	50
Obrázek 6-9 Přepětí na primární straně transformátoru	51

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Dovolená napětí	13
Tabulka 2-2 Příčiny a velikosti přepětí ^[10]	15
Tabulka 2-3 Stanovené výdržné napětí	20
Tabulka 3-1 Maximální bleskový proud	23
Tabulka 4-1 Třídy přepětí ^[11]	34
Tabulka 5-1 VA charakteristika omezovače přepětí	40

1 Úvod

Cílem této práce je představit problematiku koordinace izolace a aplikovat ji na konkrétní síť. Mohu takto nepřímou navázat na svou bakalářskou práci, kde jsem se problematikou přepětí částečně zabýval. S vedoucím bylo upřesněno téma práce a oponentem specifikována osnova.

První část je věnována základním informacím o nejběžnějších druzích přepětí, jejich příčinách a důsledcích. Pro analýzu přepětí v sítích je tahle kapitola důležitým vstupním textem k celé problematice.

Druhá kapitola se zabývá konkrétně jednomu druhu přepětí, a to atmosférickému. Veškerá přenosová, nebo distribuční soustava musí občas odolávat bleskovým výbojům, a proto je nutné síť chránit. V praxi je problematika atmosférických přepětí nejnepríznivější situací, která může nastat.

Třetí kapitola představuje soubor předpisu a norem, které se používají pro koordinaci izolace a analýzu přepětí. Dle těchto norem se provádí činnost v elektroenergetice a jsou zásadní pro ochranu před přepětím. V dalších dvou kapitolách je uvedena konkrétní síť, která leží v Austrálii. Pro tuhle síť analyzuji druhy přepětí, které mohou v soustavě nastat. Primárně se čtvrtá kapitola zaměřuje na modelování a simulaci přepětí v programu ATP-EMTP. Výsledky simulace jsou srovnány s hodnotami výpočtu dle uvedených norem. Praktikujeme především úder blesku do vedení v co nejbližší možné vzdálenosti od transformátoru. Studie prokázala, že nejhorší možný případ je úder blesku do fázového vodiče. Takto byla stanovena bezpečnostní vzdálenost L .

V práci je uváděna hodnota BIL (Basic Insulation Level) která představuje hladinu izolace, pro kterou by měl být chráněný transformátor navržen. Další části simulace dokazují závislost délek přírodních vedení k transformátoru. Ty by měly být co nejkratší, kvůli většímu indukovanému přepětí v přírodních vodičích.

2 Druhy přepětí a příčiny jejich vzniku

Problematicke přepětí je třeba se věnovat ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je zvýšené namáhání izolačních systémů všech prvků EES (elektroenergetická soustava). Přepětí způsobuje jak poruchy a škody na vlastních zařízeních, tak ztráty plynoucí z přerušení dodávky elektrické energie. Druhým důvodem pro studium přepětíových jevů je problematika elektromagnetického rušení. Zatímco vliv přepětí na izolační systémy byl sledován od samotného počátku využívání elektrické energie, elektromagnetické rušení vystupuje v souvislosti s provozováním EES do popředí v posledních desetiletích.

Vztah mezi velikostí přepětí, která se mohou v určitém místě EES vyskytovat, a parametry izolačních systémů prvků EES je řešen v rámci opatření, která se souhrnně nazývají koordinace izolace.

Hodnota napětí je definovaná pro PCC (Point of Common Coupling – společný napájecí bod). Zátěžný proud, který teče přívodním vedením ke spotřebiteli, vyvolává úbytky napětí, které jsou úměrné elektrické vzdálenosti spotřebitele od PCC. Zátěž na straně spotřebitele je proměnlivá v čase. Hodnota napětí je tedy funkční závislostí nejen elektrické vzdálenosti, ale i času. Za normálních provozních podmínek musí být napětí v síti v povolené toleranci $U_n = \pm 10\%$ v PCC. V této toleranci musí být 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 min. během každého týdne. Do roku 2003 platily hodnoty $U_n = +10\% / -6\%$.

Podle nejnovějšího předpisu ČSN EN 60038 (Jmenovitá napětí CENELEC) jsou povoleny hodnoty v tabulce 2-1.

U_N (kV)	ΔU
400	$\pm 10\%$
220	$\pm 10\%$
110	$\pm 5\%$
22	+10 %, -5 %

Tabulka 2-1 Dovolená napětí

Pokud bude hodnota napětí na spotřebičích větší než povolená, bude se zkracovat jejich doba životnosti a bude docházet k rychlejšímu stárnutí izolace. Elektrické ztráty jsou při vyšším napětí menší, protože se sníží elektrický proud. Při hodnotě napětí nižší, než je povolená, dojde k poklesu výkonu, špatné funkci, nebo úplnému vypnutí zařízení (magnetické vypínače).^[4]

2.1 Definice přepětí

Přepětí je podle literatury a norem většinou definováno jako jakékoli napětí mezi fázemi, nebo mezi fází a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí.

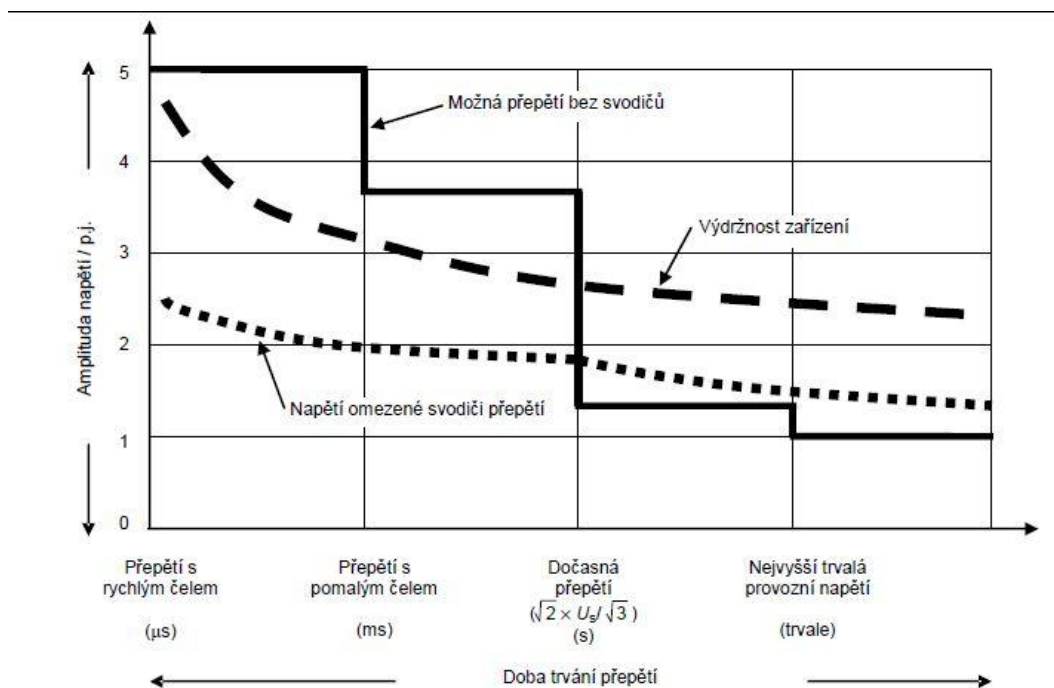
K přepětí dochází v napájecích sítích v důsledku poruch a rušení, například závad, úderů blesků nebo spínací činnosti. Tyto mohou zařízení namáhat nad rámec jeho konstrukční odolnosti a nepříznivě ovlivnit výkon sítě.^[2]

Znalost konkrétního typu přepětí je důležitá při specifikaci a návrhu omezovače přepětí, jelikož se tím definuje požadovaná odolnost, ochranný rozdíl a schopnost pohlcování energie.

Vztahy mezi typickým namáháním přepětí jsou znázorněny na obrázku 2-1. Několik příkladů přepětí, která se typicky vyskytují v napájecí síti, je shrnuto v tabulce 2-2. Předpokládá se, že standardní napájecí zařízení má dostatečnou přirozenou izolační pevnost v rozsahu síťového kmitočtu a dočasného přepětí.

Při volbě ochrany elektrických zařízení před přepětím se musí uvažovat celý rozvod s tímž provozním napětím, a nikoliv jen jeho jednotlivé části, a to s přihlédnutím k přepětí přeneseným z jiného obvodu.^[2]

Při volbě ochrany elektrických zařízení před přepětím se musí přihlížet ke koordinaci izolace a požadovaným izolačním hladinám. Je-li některé zařízení v rozvodné soustavě provozováno napětím nižším, než je jmenovité napětí sítě, musí se použít svodičů přepětí odpovídajících tomuto provoznímu napětí.^[11]



Obrázek 2-1 Typická napětí a doby jejich trvání^[11]

Poznámka: $1 \text{ p.j.} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{3}}$

Zdroje	Běžný rozsah poměrné jednotky (p.j.)
Dočasná přepětí	
Poruchy jednofázového vedení proti zemi:	
Efektivně uzemněná soustava	1,3 až 1,4
Neuzemněná soustava	$\geq 1,7$
Vypnutí zátěže	1,2 až 1,5
Ferrantiho jev: 200 km vedení	1,02
300 km vedení	1,10
Spínání vedení ukončeného transformátorem	1,2 až 1,8
Přepětí s rychlými čely	
Napájené vedení	
Vybité vedení	1,5 až 2,9
Trojfázové opětovné zapnutí bez předem vložených rezistorů	3,0 až 3,7
Trojfázové opětovné zapnutí s 1 x předem vloženými rezistory	1,6 až 2,2
Trojfázové opětovné zapnutí se svodiči (3 sety při 1,5 p.j. U_{ps})	1,8 až 2,5
Trojfázové opětovné zapnutí s řízeným zapnutím při nulovém napětí	1,5 až 1,7
Jednofázové opětovné zapnutí	1,5 až 2,0
Iniciace poruchy: Bezporuchová fáze	2,1
Spojený obvod	1,5
Odstranění poruchy	1,7 až 1,9

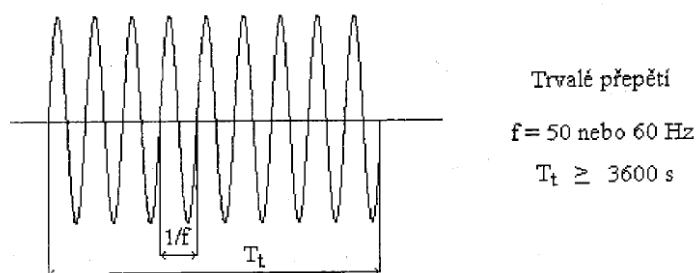
Tabulka 2-2 Příčiny a velikosti přepětí^[10]

2.2 Druhy přepětí

Přepětí v trojfázových střídavých soustavách je jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fázemi a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Přepětí se mohou lišit svou velikostí, časovým průběhem, příčinou vzniku, frekvencí výskytu.^[8]

- **Trvalé přepětí**

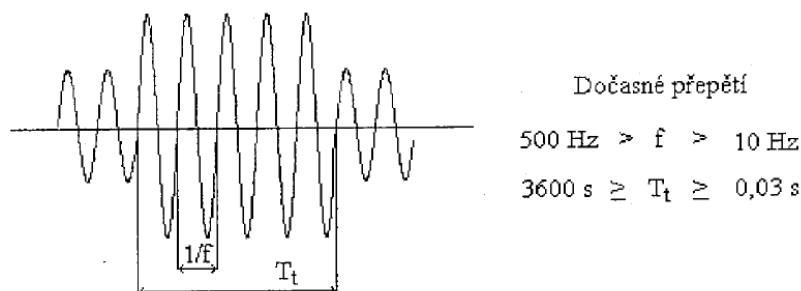
Jako napětí síťového kmitočtu, u kterého se efektivní hodnota považuje za konstantní, trvale přivedené ke dvojici svorek izolačního uspořádání. Může vzniknout v důsledku nesprávně nastaveného přepínače odboček na transformátoru.



Obrázek 2-2 Trvalé přepětí^[4]

- **Dočasné přepětí**

Vznikne například při jednofázovém zemním spojení v soustavě s izolovaným uzlem. Před poruchou je napětí fází proti zemi rovno napětí fázovému, při zemním spojení se fáze bez poruchy dostanou proti zemi na sdružené napětí. Toto napětí na obou fázích zůstane tak dlouho, než bude zemní spojení odstraněno, přičemž soustava může během poruchy nadále dodávat elektrickou energii.



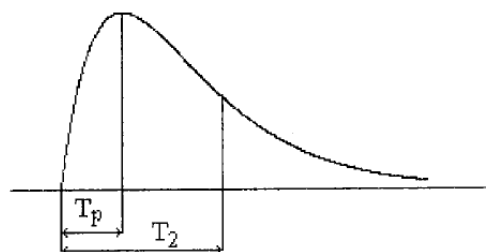
Obrázek 2-3 Dočasné přepětí^[4]

- **Přechodné přepětí**

Mohou mít různé příčiny. Kromě svého průběhu se od dočasných přepětí liší tím, že samy odezní bez potřeby jakéhokoli zásahu do chodu EES (proto název přechodná přepětí). Krátkodobé přepětí v délce několika milisekund nebo méně, oscilační nebo neoscilační, obvykle vysoce tlumené.

Příkladem přechodných přepětí jsou přepětí vznikající při spínání kondenzátorových baterií.

- **Přepětí s pomalým (dlouhým) čelem** – zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $20 \mu s < T_1 \leq 5000 \mu s$ a trváním týlu $T_2 \leq 20 ms$,



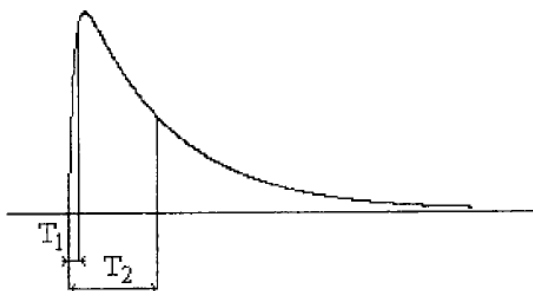
Přechodné přepětí s dlouhým čelem

$$5000 \mu s \geq T_p > 20 \mu s$$

$$T_2 \leq 20 ms$$

Obrázek 2-4 Přechodné přepětí s dlouhým čelem^[4]

- **přepětí s rychlým čelem** – zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$ a trváním týlu $T_2 < 300 \mu s$,



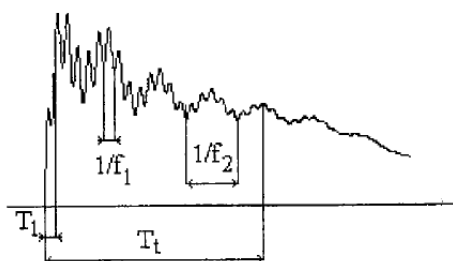
Přechodné přepětí s krátkým čelem

$$20 \mu s \geq T_1 > 0,1 \mu s$$

$$T_2 \leq 300 \mu s$$

Obrázek 2-5 Přechodné přepětí s krátkým čelem^[4]

- **přepětí s velmi rychlým čelem** – zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $T_1 \leq 0,1 \mu s$ a se superponovanými oscilacemi s kmitočtem $30 kHz < f < 100 MHz$ nebo bez nich.



Přechodné přepětí s velmi krátkým čelem

$$100 ns \geq T_1 \geq 3 ns$$

$$T_t \leq 3 ms$$

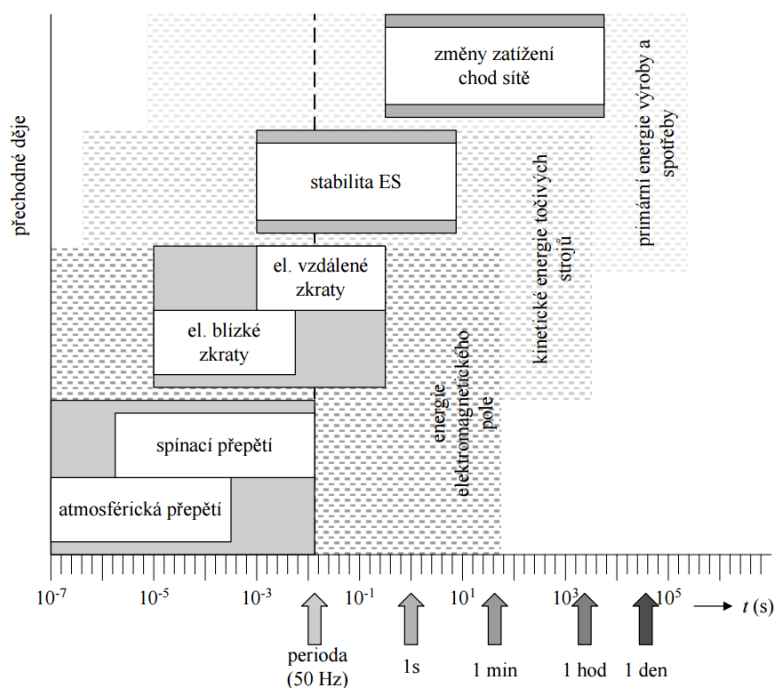
$$0,3 MHz < f_1 < 100 MHz$$

$$30 kHz < f_2 < 300 kHz$$

Obrázek 2-6 Přechodné přepětí s velmi rychlým čelem^[4]

Pro přechodná přepětí se také používá rozdělení na přepětí spínací – to jsou přepětí s pomalým čelem a atmosférická, což jsou přepětí s rychlým a velmi rychlým čelem. Tato zažitá terminologie vystihuje příčinu vzniku těchto přechodných přepětí v elektrické síti.

Z výše uvedených definic je patrné, že spínací i atmosférická přepětí jsou velmi rychlými přechodnými ději, které v elektrické síti vznikají buď náhlou změnou v konfiguraci prvků sítě – spínacími operacemi, nebo jako důsledek úderu blesku do některé vnější části sítě.^[8]



Obrázek 2-7 Časový rámec přechodných dějů v ES^[8]

Pokud jsou přepětí elektromagnetické přechodné děje, které probíhají řádově od mikrosekund (atmosférická přepětí) po milisekundy (spínací přepětí), je třeba při jejich řešení a případném modelování; takový časový rámec respektovat. Znamená to zanedbatelný vliv napětí a proudu základní frekvence, a naopak značný vliv prostorově rozprostřených kapacit a indukčností, a tedy vlnový charakter šíření výkonu a energie. Analýza přepětíových jevů v prostředí distribuční sítě je tedy poměrně složitou úlohou, kterou je nutno řešit s ohledem na množství vlnových rozhraní, které mají rozhodující vliv na průběh a amplitudu proudových a napětíových vln.^[8]

2.3 Spínací přepětí

Spínací přepětí vznikají při náhlých změnách parametrů soustavy, jako jsou plánovaná havarijná vypínání a zapínání vedení, transformátorů a jiných elementů sítě a též při zemním spojení a zkratech. Přechodné jevy při těchto pochodech mají oscilační charakter.^[2]

2.3.3 Přepětí při zemních spojeních v trojfázových soustavách

Při trvalém zemním spojení v soustavách s izolovaným nulovým bodem nebo se zhášecí tlumivkou vznikají dočasná přepětí o kmitočtu 50 Hz, která mohou být nebezpečná i pro soustavy se jmenovitým napětím větším než 35 kV.

Přechodná přepětí oscilačního charakteru v soustavě s izolovaným nulovým bodem vznikají při zapnutí trvalého zemního spojení, při jeho vypnutí nebo při přerušovaném zemním spojení. Takto mohou obvykle dosáhnout hodnoty přepětí 1,3-1,7 p.j.^[8]

2.3.4 Přepětí při vypínání zkratů

Jevy, které vznikají při vypínání zkratových i jiných proudů ve vypínači a v obvodu, jsou podmíněny obvodem (sítí) i vypínačem. Jakmile vypínací mechanismus vypínače dostane impuls, začnou se jeho kontakty oddalovat a vytvoří se mezi nimi oblouk udržovaný zdrojem proudu až do okamžiku definitivního přerušení proudu. Předpokládejme, že proud vypínáme ideálním vypínačem, jemuž určíme tyto vlastnosti: před přerušením proudu má vypínací dráha nekonečně velkou vodivost, po přerušení proudu nabude skokem nekonečně velkého odporu a proud se přeruší přesně v nule sinusovky proudu. Hned po přerušení proudu vznikne mezi kontakty vypínače zotavené napětí, které u ideálního vypínače bude určeno jen vlastnostmi obvodu. Hodnoty přepětí mohou nabývat až 2 p.j. síťového napětí.^[8]

2.3.5 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Vznikají při vypínání transformátorů naprázdno, při vypínání naprázdno motorů s kotvou nakrátko, při vypínání reaktoru nebo kompenzační tlumivky. Přepětí namáhá vypínací dráhu vypínače, která se zpravidla během vypínání prorazí, a tak vzniká tzv. opětový zápal, který se opakuje, dokud vzdálenost mezi kontakty vypínače není tak velká, aby odolala vzrůstu zotaveného napětí.

Nemůže-li se zabránit vzniku přepětí a těmto opětovným zápalům (rychlým vypínačem, paralelními odpory u vypínače), je nutno chránit svorky transformátoru (tlumivky, reaktoru) před přepětím pomocí svodičů. Obvykle přepětí naroste na hodnotu 2 p.j. V extrémním případě 2,5 p.j.^[8]

2.3.6 Přepětí při spínání kapacitních proudů

Jako kapacitní označujeme střídavé proudy, které předbíhají napětí zdroje o $\pi/2$. Ke vzniku přepětí může dojít nejen při jejich vypínání, ale na rozdíl od induktivních proudů i při jejich zapínání. Typickými operacemi spínání kapacitních proudů jsou připínání a odepínání kondenzátorové baterie nebo vypínání nezatíženého vedení. Tento jev může způsobit přepětí až 2 p.j.^[8]

2.4 Výdržné napětí

Hodnota zkušebního napětí použitého za stanovených podmínek při výdržné zkoušce, při níž se připouští stanovený počet průrazů nebo přeskoků.

Označují se dva typy výdržných napětí:

- **Konvenční výdržné napětí:** odpovídá výdržná pravděpodobnost $P_w = 100 \%$. To znamená, že je počet výbojů s průrazem, nebo přeskokem roven nule.
- **Statistické výdržné napětí:** podle normy ^[10] je stanovena výdržní pravděpodobnost $P_w = 90 \%$. Počet přípustných výbojů s přeskokem nebo průrazem odpovídá stanovené výdržné pravděpodobnosti.

Norma ^[10] tedy předepisuje použít pro samočinně neobnovující se izolaci **konvenční výdržné napětí** a pro samočinně obnovující se izolaci **statistické výdržné napětí**. Tak stejně zmíněná norma stanoví normalizované výdržné napětí U_w na základě nejvyššího dovoleného napětí v síti U_m . V textu se používá výraz BIL (*Basic Insulation Level*). Tato hodnota odpovídá hodnotám U_w .

Nejvyšší napětí pro zařízení U_m (kV)	Normalizované krátkodobé jmenovité výdržné střídavé napětí síťového kmitočtu (kV)	Normalizované jmenovité výdržné přepětí při atmosférickém impulzu (kV) BIL
72,5	140	325

Tabulka 2-3 Stanovené výdržné napětí

Normalizovaná zkouška výdržným napětím je zkouška provedená za stanovených podmínek pro ověření toho, že izolace vyhovuje normalizovanému jmenovitému výdržnému napětí.

Zkouška zahrnuje:

- krátkodobé zkoušky napětím síťového kmitočtu;
- zkoušky spínacím impulzem;
- zkoušky atmosférickým impulzem;
- kombinované zkoušky spínacím napětím;
- kombinované napěťové zkoušky. ^[14]

3 Problematika atmosférických přepětí

Bouřky, a především s nimi spojené atmosférické výboje (LEMP – lightning electromagnetic pulse – elektromagnetický impulz vyvolaný bleskem) vytvářejí odedávna fascinující přírodní divadlo, jehož efekty dokáže ještě znásobit pozadí noční oblohy.^[2]



Obrázek 3-1 Bouřka

Zároveň ale přinášejí velmi podstatné nebezpečí pro člověka a jeho okolí, což zásadním způsobem utvářelo celou pohnutou historii pohledu lidí na blesky.

Z technického hlediska probíhají atmosférické výboje mezi mraky navzájem nebo mezi částmi mraků a zemí. Vznikají jako důsledek rozdílů mezi elektrickými náboji ve vzdušném obalu země, jejichž příčinu lze spatřovat především v pohybech obrovských vzduchových mas. K těmto pohybům dochází vlivem vzestupného proudění vlhkého a teplého vzduchu, které může mít hned několik důvodů. Podle nich lze rozlišovat tyto hlavní druhy bouřek:^[2]

- **tepelná bouřka,**
- **geografická bouřka,**
- **frontální bouřka.**

3.1 Vznik atmosférických přepětí

Ve výšce 2 až 5 km nad zemí vzniká bouřkový mrak s rozměry kolem 5 až 11 km. Lehké ledové vločky z vyšších částí mraku nesou kladný náboj, těžší kousky ledu (kroupy) v jeho spodní části náboj opačný, tedy záporný. Vlivem zmíněné polarizace zledovatělých částí mraku vzniká na zemském povrchu kladný zrcadlový náboj. Po dosažení intenzity elektrického pole mezi mrakem a zemským povrchem 0,5 až 10 kV/cm se začíná postupně vytvářet atmosférický výboj. Skutečnou kritickou hodnotu intenzity ovlivňují především místní dielektrické vlastnosti ovzduší.

Od oblasti záporného náboje ve spodní části mraku je tvořen ionizací částic vzduchu kanál blesku s tenkým vodivým jádrem, který se stupňovitě blíží k zemskému povrchu. Postupuje po asi 50 m s prodlevami mezi jednotlivými kroky asi 50 μ s. Ve vzdálenosti několika desítek metrů od povrchu dochází v místech s vyšším gradientem intenzity elektrického pole k překročení kritické hodnoty elektrické pevnosti vzduchu a z povrchu země začne postupovat opačným směrem tzv. vstřícný výboj. Po jeho spojení s kanálem blesku vznikne celistvá vodivá dráha, po níž postupuje rychlostí blízkou rychlosti světla vstřícný výboj dále vzhůru. Vytváří se vodivý ionizovaný kanál o průměru asi 5 cm, v němž dochází k extrémnímu nárůstu proudové hustoty, a tedy i teploty, která dosahuje 20 000 až 30 000 °C. Takto se postupně rozvíjí tzv. hlavní bleskový výboj, dosahující maxima proudu asi po 50 μ s při době trvání okolo 250 μ s. Související akustické projevy pak vnímáme jako hrom.^[2]

3.2 Účinky atmosférického výboje

Atmosférický výboj registrujeme v životě především podle neelektrických jevů, které jsou různorodé. Mezi tyto nežádoucí projevy patří účinky:

- **tepelné,**
- **mechanické,**
- **elektrodynamické,**
- **elektrické průrazy,**
- **elektromagnetické indukce.**

Tepelné účinky způsobuje prudký nárůst teploty v kanále blesku a oteplením materiálů o nenulové rezistivitě při přímém průchodu proudu atmosférického výboje. Obě možnosti jsou velice závažné a mohou způsobit poškození, popřípadě vznícení materiálů, s nimiž blesk přišel podél své dráhy do přímého, nebo i nepřímého kontaktu. Obdobné účinky může mít také vysokofrekvenční složka bleskového proudu (má-li velkou amplitudu), protože může nadměrně zahřívat materiály se špatnými dielektrickými vlastnostmi.

Prudký nárůst teploty může být provázen také některými sekundárními jevy. Např. při úderu blesku do ne zcela vyschlých trámů nebo stromů dochází k prudkému odpaření vody přítomné v dřevní hmotě. Jestliže nemá vzniklá pára kam uniknout, její tlak může působit velmi destruktivně na strukturu dřeva. Totéž platí o zdivu nebo střešní krytině.

V případě budov bývá příčinou mechanického poškození především elektrodynamická síla. Při průchodu bleskových proudů vodiči dochází k jejich uvolňování, popř. vytrhávání ze svorek a úchytů. Totéž může ale platit i pro jiné drobnější vodivé části staveb. Vodiče a nejrůznější vedení také zpravidla zavlečou dílčí bleskové proudy do celé budovy, a tím se jejich destruktivní účinky rozšíří na další spotřebiče.^[2]

3.3 Kritéria pro ochranu před bleskovým proudem

Této problematice se nejvíce věnuje norma ČSN EN 62 305 ed. 2. Norma je určena pro ochranu před bleskem pro stavby a hodnoty napětí do 1 000 V (NN). V první části norma obsahuje kapitoly pro určování a parametry bleskového proudu. Tyto obecné parametry bleskového proudu a atmosférického přepětí jsou platné i pro průmyslové sítě.^[6]

Ideální ochranou staveb a inženýrských sítí by bylo uzavření chráněného objektu uvnitř uzemněného a dokonale vodivého souvislého stínění s odpovídající tloušťkou a na vstupu do stínění zajištění odpovídajícího pospojování inženýrských sítí přivedených do stavby.

Toto by mělo zabránit pronikání bleskového proudu a souvisejícího elektromagnetického pole do chráněného objektu a zabránit nebezpečným tepelným a elektrodynamickým účinkům proudu, stejně jako nebezpečnému jiskření a přepětím ve vnitřních systémech.^[7]

V praxi často není možné ani cenově efektivní jít do takového rozsahu, aby byla zajištěna optimální ochrana.

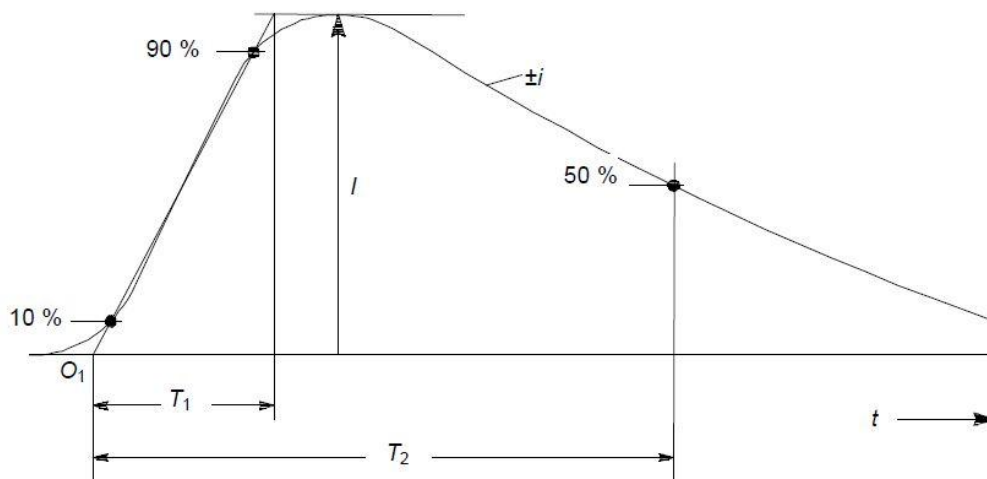
Pro účely tohoto studia jsou zavedeny čtyři hladiny ochrany před bleskem (LPL I až IV). Pro každou LPL je stanoven soubor maximálních a minimálních parametrů blesku.^[3]

LPL	I	II	III	IV
I_{IMP} (10/350 μ s)	200 kA	150 kA	100 kA	100 kA

Tabulka 3-1 Maximální bleskový proud

LPL – hladina ochrany před bleskem (Lightning Protection Level) – číslo vztažené k souboru hodnot parametrů bleskového proudu, odpovídající pravděpodobnosti, že příslušné maximální a minimální návrhové hodnoty nebudou u blesků vyskytujících se v přírodě překročeny.

Obrázek 3-2 Parametry bleskového proudu^[16]



- O_1 efektivní počátek
- I vrcholová hodnota proudu
- T_1 doba čela
- T_2 doba půltýlu

Systém, který slouží k monitorování bleskových výbojů, se jmenuje CELDN (Central European Lightning Detection Network). Tato síť obsahuje přibližně 20 detekčních senzorů a je součástí celoevropského sdružení EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection). Statistickým zpracováním dat těchto systémů je možno vysledovat různé parametry blesků s jejich četností.

Parametr	Typ výboje	Kumulativní relativní četnost		
		95%	50%	5%
I [kA]	záporný první dílčí výboj	4(98%)	20(80%)	90
	záporný následný dílčí výboj	4,9	11,8	28,6
	kladný blesk	4,6	35	250
Q [C]	záporný první dílčí výboj	1,1	4,5	20
	záporný následný dílčí výboj	0,22	0,95	4
	záporný blesk	1,3	7,5	40
	kladný blesk	20	80	350
T ₁ [μs]	záporný první dílčí výboj	1,8	5,5	18
	záporný následný dílčí výboj	0,22	1,1	4,5
	kladný blesk	3,5	22	200
S [kA/μs]	záporný první dílčí výboj	9,1	24,3	65
	záporný následný dílčí výboj	9,9	39,9	161,5
	kladný blesk	0,2	2,4	32

Obrázek 3-3 Parametry bleskového proudu

3.4 Úder blesku do vedení, nebo jeho blízkosti

Obecně existují tři typy atmosférických událostí spojených s venkovním vedením. První je přímý úder blesku do vedení kvůli chybě nebo chybějícímu stínění. Druhým případem je blízký úder blesku do země a vznik impulzů indukovaného napětí v obvodu. Třetím případem je takzvaný zpětný přeskok, kdy mohou nastat následné údery do stíněných vodičů nebo sloupů kvůli zemnímu napětí, vzniklému zpětným přeskokem přes izolátor na fázový vodič.

3.4.1 Přímý úder do fázového vodiče

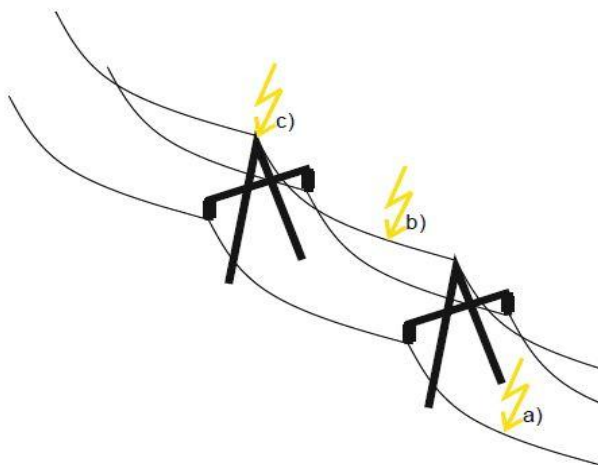
K přímým úderům může dojít buď na nestíněných vedeních, nebo při selhání stínění na stíněných vedeních. K přeskoku dojde z fázového vodiče na stožár. U nestíněných venkovních vedení jsou zásahy do fázových vodičů mnohem častější než do stíněných vedení. Při zasažení vedení je bleskem injektován proudový impulz, který se šíří na obě strany. Napěťové a proudové vlny se odráží v místech, kde dochází ke změně impedance vedení. Při úderu blesku do nadzemního vedení musí dojít k přeskoku na nejbližším izolačním závěsu. Přepěťová vlna v jednom vodiči indukuje přepětí v sousedních vodičích.

3.4.2 Údery do stínících vodičů nebo stožárů, zpětné přeskoky

Vznikají, když atmosférický výboj zasáhne stínící vodič (zemní lano) nebo stožár při vzniku vysokého napětí na izolátoru, které způsobí přeskok ze stožáru na fázový vodič. Místní zemní podmínky (zemní odpor, konstrukce základu) mají největší vliv na zpětný přeskok.

Venkovní stínící vodič je navržen k zachycování většiny atmosférických výbojů, které by mohly zasáhnout fázové vodiče. Většina proudu se tak vybije přes stožár a uzemnění s poměrně s malým proudem přes svodič přepětí vedení. Zpětný přeskok snižuje energetické namáhání svodiče přepětí vedení, ale jeho energetické namáhání narůstá s rostoucím zemním odporem stožáru.

Vzhledem k odolnosti izolace jsou zpětné přeskoky méně pravděpodobné v rozsahu II (nad 245 kV) než v rozsahu I (nad 1 kV do 245 kV včetně) a jsou řídké v sítích 500 kV a výše. ^{[10], [11]}



Obrázek 3-4 Přímé údery blesků do vedení (a) přímý zásah do fázového vodiče, b) přímý zásah do zemního lana, c) přímý zásah do uzemněné části stožáru)

3.5 Koordinace izolace pro atmosférická přepětí

Chování venkovních vedení za bouřek závisí na různých faktorech, mezi kterými jsou nejdůležitější:

- **Hustota úderu blesku do země**

Hustota výskytu blesku N_g je základním parametrem při provozu elektroenergetických systémů. Vyjadřuje četnost výskytu blesku mezi oblakem a povrchem země jako počet bleskových úderů na 1 km² povrchu země za jeden rok. Podle výskytu bouřek jsou vypracovávány izokeraunické mapy, které vyznačují počet úderů blesků na km² plochy.^[15]

$$N_g = 0,023 \cdot Td^{1,3}$$

kde

T_d hodnota dle izokeraunické mapy

- **Výška venkovního vedení a uspořádání vodičů**

Tyto parametry ovlivňují četnost přímých úderů do vedení N_d za rok na 100 km vedení. [16]

$$N_d = 0,1 \cdot K_0 \cdot N_g \cdot (b + 10,5 \cdot H^{0,75})$$

kde

N_g četnost úderu do země

H průměrná výška vedení v m

b horizontální vzdálenost mezi krajními vodiči

K_0 orografický koeficient vyjadřující stínící účinek okolního terénu.

- **Ochrana zemnicími lany**

Jako ochrana proti přímým výbojům do vedení se nad fázové vodiče umísťují zemnicí lana. Jsou navrženy tak, aby úder blesku do zemnicích lan byl pravděpodobnější než do fázových vodičů. Viz kapitola 3.4.1.

- **Uzemnění stožáru**

Vrcholová hodnota přepětí a energie je úměrná odporu uzemnění nejbližších stožárů. Tuto energii z velké části musí absorbovat omezovače přepětí chránící zařízení. Proto má být odpor uzemnění prvního sloupu nebo stožáru před chráněným zařízením co nejmenší.

- **Izolační pevnost**

Ve všech materiálech je způsobena vodivost pohybem nabitých částí. Vodiče mají velký počet poměrně volných elektronů, které se pohybují v přiloženém elektrickém poli, kdežto izolanty mají těchto volných elektronů velmi málo. Když se zvýší elektrické namáhání v izolantu na dostatečně vysokou hladinu, odpor podél některé dráhy v izolantu se změní z vysoké hodnoty na hodnotu srovnatelnou s vodiči. Tato změna se nazývá průraz. Více v kapitole 2.4.

3.6 Distribuční vedení

U distribučních vedení se má předpokládat, že každý přímý úder blesku do vedení způsobí přeskok mezi fázemi s přeskokem k zemi nebo bez něho. Ochrana zemnicím lanem není účinná, protože uzemnění a pevnost izolace nemůže být ekonomicky zlepšena do té míry, aby se zabránilo zpětným přeskokům. Chování distribučních vedení za bouřek je tedy většinou určeno hustotou úderu blesku do země a výškou vedení. Pro distribuční vedení s neuzemněnými konzolami (vedení na dřevěných sloupech) nemají indukovaná přepětí z blízkých úderů k zemi žádný význam. Avšak vysoká elektrická pevnost k zemi způsobuje vlny přepětí s vysokou vrcholovou hodnotou vstupující do stanice, a v těchto případech je nutné zvážit vhodnou volbu staničních svodičů přepětí (zvýšena namáhání svodičů energií). U distribučních vedení s uzemněnými konzolami mohou indukovaná přepětí ovlivnit požadovanou pevnost izolace venkovních vedení při atmosférickém impulzu.^[15]

3.7 Přenosová vedení

U přenosových vedení nad 72,5 kV mohou být indukovaná přepětí zanedbána a chování za bouřek určují pouze přímé údery blesku do vedení. Obecný pokyn pro vhodnou cílovou poruchovost nelze uvést, protože tato poruchovost většinou závisí na následcích výpadku za bouřky a na nákladech na zlepšení stínění, uzemnění a izolační pevnosti. Je však možné navrhnout četnost výpadků úseku vedení před stanicí menší než zbytku vedení, tak, aby se zmenšily vrcholové hodnoty a četnost vln přepětí vstupujících do stanice, a aby se také zmenšila pravděpodobnost výskytu poruch v krátkém úseku před stanicí.^[15]

3.8 Výpočet bleskového proudu

$$I_s = \left(\frac{1,4925 \cdot d}{H^{0,6} - y^{0,6}} \right)^{1,351}$$

H	průměrná výška zemnicího lana
y	průměrná výška fázového vodiče
d	krajní vzdálenost k zemnicímu lanu ^[17]

Podle tohoto vztahu nám výpočet pro síť 66 kV dává hodnotu 7 kA. Větší hodnoty bleskového proudu pravděpodobněji zasáhnou zemnicí vedení. Přímý zásah bleskového proudu do fázového vodiče bude maximálně 7 kA. Vznikne přeskok na izolátoru a část energie bude svedena do země.

V případě zásahu blesku do vrcholu stožáru, nebo zemnicího lana, může proud nabývat hodnot až 100 kA. Větší hodnoty jsou velice nepravděpodobné.^[17]

4 Koordinace izolace dle IEC 60071

Izolační systémy mohou být tvořeny pevným, kapalným nebo plyným izolantem, nejčastěji jejich kombinací. Izolátory jsou vyrobeny z pevného izolantu (keramiky, skla, pryže) obklopeného vzduchem, transformátorová průchodka je kombinací pevného izolantu tělesa průchodky a izolace vlastního vodiče, kapalného izolantu obklopujícího vodič uvnitř průchodky a plyného izolantu vně tělesa průchodky. Při příliš velkém napětí pro daný izolační systém může dojít v plyném nebo kapalném izolantu k elektrickému přeskoku nebo v pevném izolantu k elektrickému průrazu. Zatímco v případě plyného a kapalného izolantu po snížení napětí po určité době dojde k obnovení izolačních vlastností, u pevného izolantu jeho průraz znamená trvalé znehodnocení. Říkáme, že plyné a kapalné izolanty jsou samoobnovitelnou izolací na rozdíl od pevného izolantu, který představuje nesamoobnovitelnou izolaci.^[4]

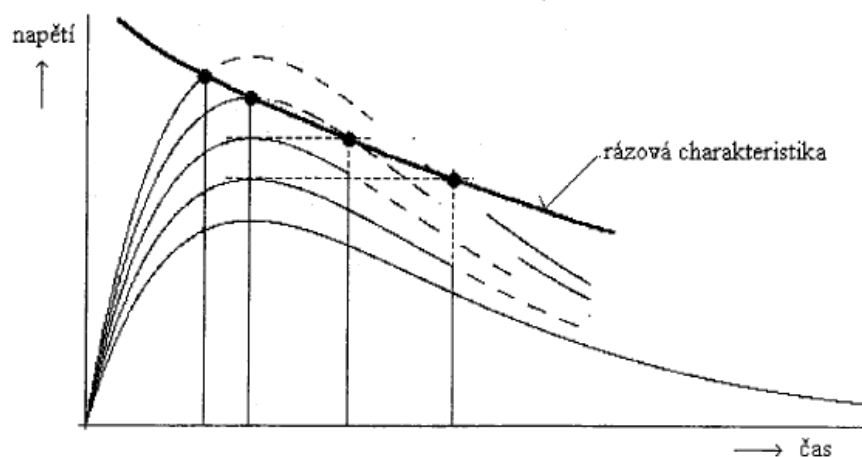
Odolnost izolačních systémů závisí kromě velikosti přepětí také na době jejich přiložení na izolační systém. V plyných izolantech je tento jev vysvětlován tak, že při napětí vytvářejícím podmínky pro elektrický výboj se v blízkosti katody musí vyskytovat volný elektron, který je schopen iniciovat vznik laviny elektronů vedoucí k výstavbě elektrického výboje.

Závislost odolnosti izolantu na době přiložení napětí má pro koordinaci izolace velký význam a jejich znalost je pro návrh izolačních systémů a parametrů svodičů přepětí klíčová. Udává se v podobě rázové charakteristiky, která je závislostí doby trvání kusého impulsu napětí určité polarity a tvaru (obvykle 1,2/50 μ s), na velikosti vrcholového napětí (obr. 9).

Při volbě ochrany elektrických zařízení před přepětím se musí přihlížet ke koordinaci izolace.

K ochraně před přepětím, zejména atmosférických, je třeba použít jednoho z níže uvedených prostředků nebo jejich kombinace:

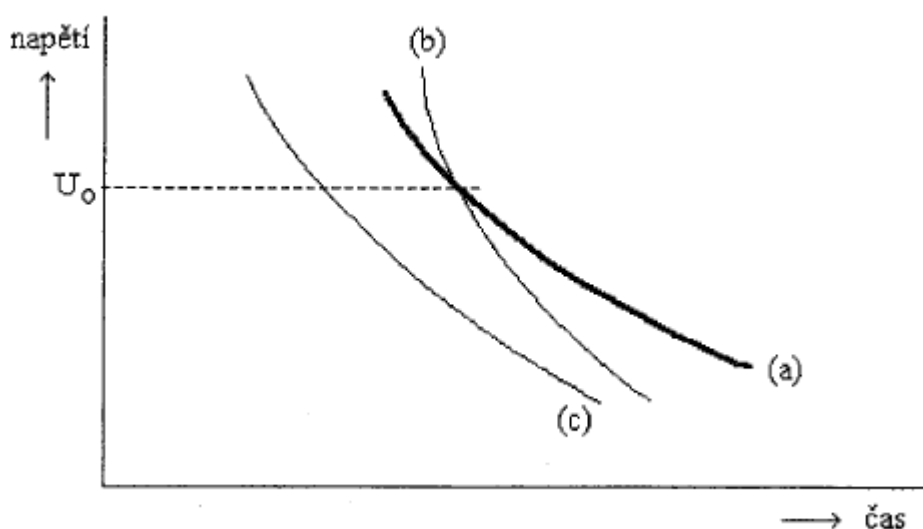
- ventilové bleskojistky,
- omezovače přepětí,
- vyfukovací bleskojistky,
- ochranná jiskřiště,
- zemnicí lano a tyčové hromosvody.



Obrázek 4-1 Rázová charakteristika^[4]

4.1 Odolnost izolačních systémů

Při znalosti rázové charakteristiky lze odhadnout, co se stane při příchodu napěťové vlny na dva paralelně připojené izolační systémy. Na obr. 4-1 je uvedena rázová charakteristika například izolátoru (a) a dva možné průběhy rázové charakteristiky jiskřiště (b, c). Z obrázku je zřejmé, že při výskytu přepětí libovolné velikosti jiskřiště (c) zapálí dříve, než bude překročena pevnost izolátoru, takže jiskřiště izolátor chrání. V případě jiskřiště (b) není izolátor chráněn při vlnách napětí s vyšší vrcholovou hodnotou než U_0 .^[4]



Obrázek 4-2 Rázová charakteristika izolátoru^[4]

4.2 Určování odolnosti izolačních systémů

Odolnost izolačních systémů se zásadně určuje napěťovými zkouškami. S ohledem na charakter časových průběhu přepětí, která se mohou na izolačních systémech v provozu vyskytnout, se provádějí tyto napěťové zkoušky:^[10]

- minutová zkouška střídavým napětím síťové frekvence,
- zkouška napěťovým impulzem 1,2/50 μ s
- zkouška spínacím impulzem 250/2500 μ s.

Napěťové úrovně zkušebních napětí jsou dány dlouholetými zkušenostmi z provozu EES. Velikost zkušebních napětí jsou uvedena v příslušných normách společně s postupem jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocením. Požadavky a větší rozbor zkoušek nejsou součástí této DP.

4.3 Ochranná hladina

Udává se u zařízení a představuje nejvyšší napětí, jehož překročení nesmí bleskojistka dovolit.

Koordinace izolace bývá nejčastěji třístupňová:

- nejnižší hladinu mají svodiče přepětí, napětí vyšší, než ochranná svedou do země;
- střední hladinu mají izolátory a průchodky, aby na nich došlo k přeskoku při selhání bleskojistek;
- nejvyšší hladinu mají stroje a přístroje – transformátory a vypínače – jsou drahé a těžko nahraditelné.

U venkovních vedení se svodiče přepětí umísťují na vstupy transformátorů, rozveden a přechody z venkovních vedení do kabelů. Transformátory jsou dokonale chráněny pouze ventilovými bleskojistkami.^[9]

4.4 Základní postupy při koordinaci izolace

Vznik přepětí v elektroenergetických soustavách nelze vyloučit a úplně nelze také vyloučit, že přes provedená opatření nedojde k překročení izolační hladiny některého zařízení. Pokud tedy připustíme možnost překročení elektrické pevnosti nějakého zařízení, připouštíme tím také možnost jeho havárie. Dojde totiž k průrazu nebo přeskoku v izolačním systému, velmi často to má za následek vznik zkratu se všemi průvodními jevy. Jestliže dojde k překročení elektrické pevnosti izolačního systému při napěťových zkouškách, projeví se to u pevného izolantu jeho lokálním drobným poškozením. U plynného nebo kapalného izolantu se díky jejich schopnosti samoobnovení izolačních schopností nestane vůbec nic. Vznik zkratu v provozních podmínkách na izolátoru často znamená jeho roztržení. Zkrat v transformátoru může znamenat jeho požár a tím praktický úplné zničení. Při porovnání uvedených příkladů následků vzniků zkratu je zřejmé, že překročení elektrické pevnosti vnitřní izolace transformátoru je z ekonomického i provozního hlediska jedna z nejzávažnějších poruch, jaká může v soustavě nastat, zatímco zničení izolátoru znamená proti tomu celkem drobnou závadu odstranitelnou zpravidla do několika hodin.

V tom spočívá odstupňování neboli koordinace izolace. Nejnižší izolační hladinu v soustavě (často nazývanou ochranná hladina) vytvářejí svodiče přepětí, nejvyšší izolační hladinu transformátory a významem srovnatelná zařízení. Mezi těmito dvěma hladinami se nachází základní izolační hladina vedení. Tímto je zajištěno, že pokud není přepětí svedeno svodičem přepětí, dojde s velkou pravděpodobností k přeskoku na izolátoru. Za cenu krátkodobého výpadku soustavy se tím omezí riziko podstatně větší škody způsobené havárií transformátoru. Odstupňování izolace lze také jinak popsat jako volbu nižší izolační hladiny pro samoobnovitelnou izolaci a vyšší pro nesamoobnovitelnou izolaci. Na transformátoru je izolačně nejslabším místem vnější povrch průchodkového izolátoru, takže výboj vně transformátoru by měl nastat dříve než průraz izolace uvnitř transformátoru.^[10]

4.5 Postup koordinace izolace

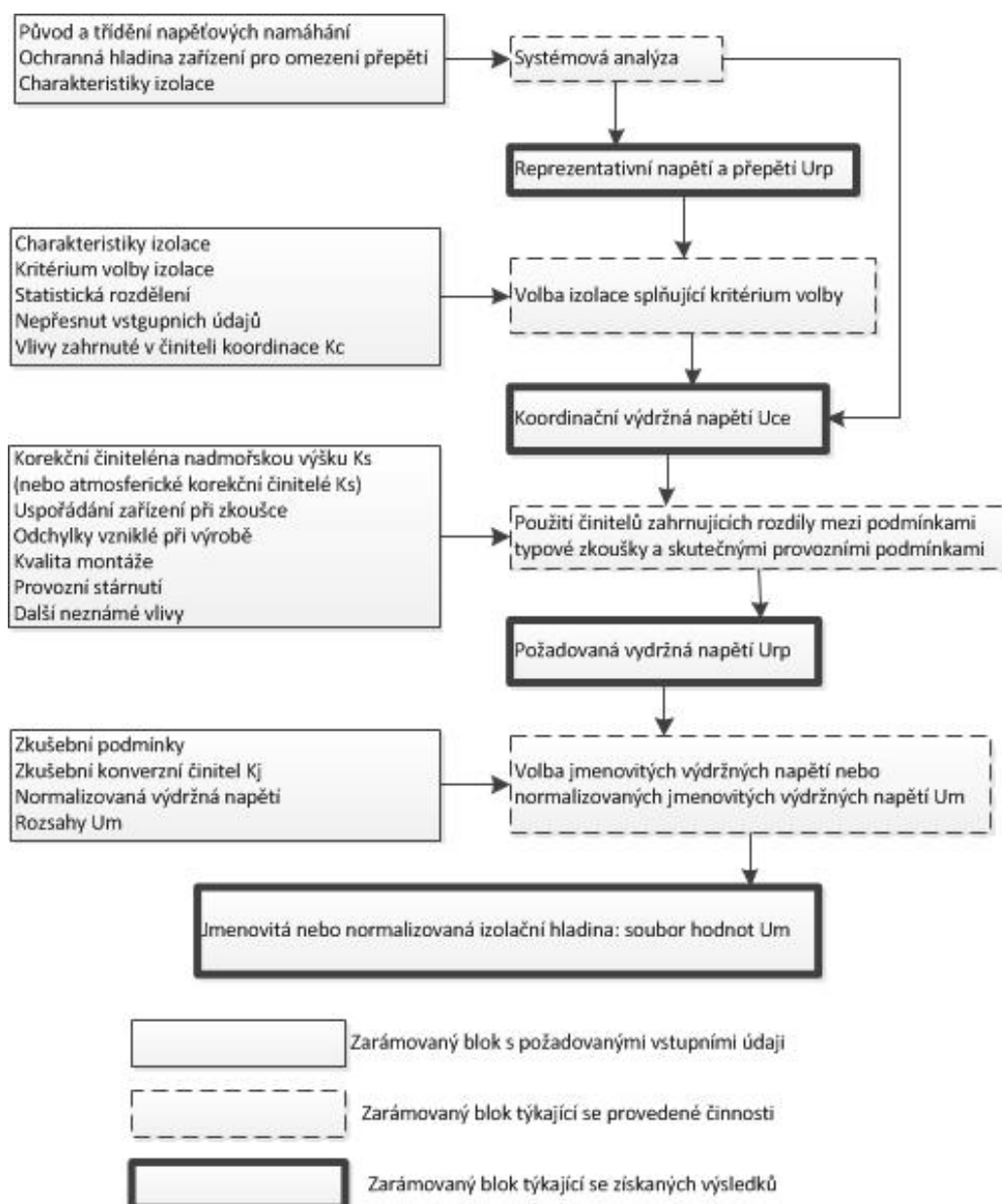
Volba elektrické pevnosti zařízení ve vztahu k provozním napětím a přepětím, která se mohou vyskytovat v síti, pro kterou je zařízení určeno, s respektováním provozních podmínek okolí a charakteristik použitých ochranných zařízení.

Metoda koordinace izolace spočívá ve volbě nejvyššího napětí pro zařízení společně se souborem normalizovaných jmenovitých výdržných napětí, která charakterizují izolaci zařízení požadovanou pro použití. Tento postup je znázorněn na obrázku 11 a jeho kroky jsou popsány v 4.6 až 4.8. Optimalizace vybraného souboru UW může vyžadovat posouzení některých vstupních údajů a zopakování části postupu.

Normalizovaná výdržná napětí musí být vybrána z přehledu řad u normalizovaných jmenovitých výdržných napětí uvedených v ČSN EN 60071-1 ed. 2. článek 5.6 a 5.7.

Soubor zvolených normalizovaných napětí určuje jmenovitou izolační hladinu. Jestliže normalizovaná výdržná napětí jsou také přiřazena ke stejným U_m podle článku 5.10 stejné normy, určuje tento soubor normalizovanou izolační hladinu.

Pro koordinaci izolace při přechodných přepětích se používají dvě metody: deterministická a statistická. Některé z používaných postupů jsou však kombinací obou metod.^[10]

Obrázek 4-3 Diagram pro stanovení jmenovitých nebo normalizovaných izolačních hladin ^[10]

4.5.1 Deterministická metoda

Tato metoda se obecně používá, chybí-li statistické informace získávané zkoušením o možné očekávané poruchovosti zařízení v provozu.

- Když je izolace charakterizována svým předpokládaným konvenčním výdržným napětím ($P_w = 100\%$), volí se výdržná hodnota rovna koordinačnímu výdržnému napětí získanému násobením reprezentativního přepětí (předpokládaného maxima) činitelem koordinace K_c vyjadřujícím vliv nejistot v předpokladech pro obě hodnoty (předpokládané výdržné napětí a reprezentativní přepětí).
- Když je, jako u vnější izolace, izolace charakterizována statistickým výdržným napětím ($P_w = 90\%$), v K_c by měl být zahrnut také vliv rozdílu mezi tímto napětím a předpokládaným výdržným napětím.

Při této metodě se nebere zřetel na možnou poruchovost zařízení v provozu.

Typické příklady jsou:

- koordinace izolace vnitřních izolací před přepětím s pomalým čelem, když je izolace ochráněna svodiči přepětí;
- ochrana svodiči přepětí před atmosférickým přepětím zařízení připojeného k venkovnímu vedení, pro které je k dispozici zkušenost s podobným zařízením.^[9]

4.5.2 Statistická metoda

Statistická metoda se zakládá na četnosti výskytu dané příčiny, na rozložení pravděpodobnosti přepětí způsobených touto příčinou a na pravděpodobnosti průrazu izolace. Jinak může být riziko poruchy určeno kombinací souběžného výpočtu pravděpodobnosti průrazu izolace a jinak může být riziko poruchy určeno kombinací souběžného výpočtu pravděpodobnosti přepětí a průrazu případ za případem za uvažování statistické povahy přepětí a přeskočků pomocí vhodných postupů, například použitím metod Monte Carlo.

Opakováním výpočtů pro různé typy izolace a různé stavy sítě lze získat celkovou výpadkovost sítě způsobenou poruchami izolace.

Použití statistické koordinace izolace tak dává možnost odhadnout četnost poruch přímo jako funkci zvolených navrhovaných činitelů sítě. V principu je možná i optimalizace, jestliže lze k různým typům poruch přiřadit náklady při výpadcích. Prakticky je to však velmi nesnadné pro obtížnost vyhodnocení následků poruch izolace za různých stavů sítě a pro nejistotu ceny nedodané energie. Proto je obvyklejší lepší izolaci sítě mírně předdimenzovat než ji optimalizovat. Návrh izolace sítě je pak založen na porovnání rizik odpovídajícím různým alternativním návrhům.^[9]

4.6 Určení reprezentativních napětí a přepětí (U_{rp})

U napětí a přepětí namáhajících izolaci musí být určena amplituda, tvar a doba trvání pomocí systémové analýzy, která zahrnuje volbu a umístění zařízení pro ochranu a pro omezení přepětí.

Pro každou třídu napětí a přepětí musí být na základě analýzy určena reprezentativní napětí a přepětí, s uvažováním charakteristik izolace, s ohledem na různé chování při tvarech napětí a přepětí v síti a na normalizované tvary napětí použitých při normalizované výdržné zkoušce, jak je uvedeno v tabulce č. 4-1.

Tabulka 4-1 Třídy přepětí ^[11]

Třída	S nízkým kmitočtem		Přechodné		
	Trvalé	Dočasné	S pomalým čelem	S rychlým čelem	S velmi rychlým čelem
Tvary napětí nebo přepětí					
Rozsah tvarů napětí nebo přepětí	$f = 50 \text{ Hz}$ nebo 60 Hz $T_1 \geq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3\,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Normalizované tvary napětí	 $f = 50 \text{ Hz}$ nebo 60 Hz T_1^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Normalizovaná zkouška výdržným napětím	a	Zkouška krátkodobým střídavým napětím	Zkouška spínacím impulzem	Zkouška atmosférickým impulzem	a

^a Stanoví příslušné komise pro zařízení.

Reprezentativní napětí a přepětí mohou být charakterizována buď:

- předpokládanou maximální hodnotou,
- řadou vrcholových hodnot,
- úplným statickým rozdělením vrcholových hodnot.

Považuje-li se za vhodné zavedení předpokládané maximální hodnoty, jsou reprezentativní přepětí různých tříd následující:

- pro trvalé střídavé napětí síťového kmitočtu: napětí síťového kmitočtu s efektivní hodnotou rovnou nejvyššímu napětí sítě a s trváním odpovídajícím době života zařízení;
- pro dočasná přepětí: normalizované krátkodobé střídavé napětí síťového kmitočtu, s efektivní

hodnotou rovnou předpokládanému maximálnímu dočasnému přepětí dělenému $\frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{3}}$;

- pro přepětí s pomalým čelem: normalizovaný spínací impuls, jehož vrcholová hodnota se rovná vrcholové hodnotě předpokládaného maxima přepětí s pomalým čelem;
- pro přepětí s rychlým čelem: normalizovaný atmosférický impuls, jehož vrcholová hodnota se rovná vrcholové hodnotě předpokládaného maxima přepětí s rychlým čelem fáze-zem;
- pro přepětí s velmi rychlým čelem: charakteristiky pro tuto třídu přepětí jsou stanoveny příslušnými přístrojovými komisemi;

- pro přepětí fáze-fáze s pomalým čelem: normalizovaný kombinovaný spínací impuls, jehož vrcholová hodnota je rovna vrcholové hodnotě předpokládaného maxima přepětí fáze-fáze s pomalým čelem;
- pro podélné přepětí s pomalým (nebo rychlým) čelem: kombinované napětí, sestávající z normalizovaného spínacího (nebo atmosférického) impulsu a napětí síťového kmitočtu, každé s vrcholovou hodnotou rovnou dvěma příslušným předpokládaným maximálním vrcholovým hodnotám a okamžikem vrcholu impulsu shodným s vrcholem napětí síťového kmitočtu opačné polarity.^[10]

4.7 Stanovení koordinačních výdržných napětí (U_{cw})

Stanovení koordinačních výdržných napětí spočívá v určení nejnižších hodnot výdržných napětí izolace, které splňují kritéria volby izolace, je-li izolace vystavena působení reprezentativních přepětí v provozních podmínkách.

Koordinační výdržná napětí izolace mají tvar reprezentativních přepětí příslušné třídy; jejich hodnoty se získají vynásobením hodnot reprezentativních přepětí činitelem koordinace. Hodnota činitele koordinace závisí na přesnosti vyhodnocení reprezentativních přepětí a na empirickém nebo na statistickém odhadu rozdělení přepětí a izolačních charakteristik.^[10]

4.8 Stanovení požadovaných výdržných napětí (U_{rw})

Stanovení požadovaných výdržných napětí izolace spočívá v převedení koordinačních výdržných napětí na vhodné normalizované zkušební podmínky. To se provede vynásobením koordinačních výdržných napětí činiteli, které kompenzují rozdíly mezi skutečnými provozními podmínkami izolace a podmínkami při normalizovaných zkouškách.^[10]

4.9 Rozsahy nejvyšších napětí pro zařízení

- **Rozsah I:** Nad 1 kV do 245 kV včetně. Tento rozsah zahrnuje jak přenosové, tak distribuční sítě. Při výběru jmenovitých izolačních hladin zařízení by se proto mělo přihlídnout k rozdílným provozním hlediskům.
- **Rozsah II:** Nad 245 kV. Tento rozsah zahrnuje hlavně přenosové sítě.^[9]

4.10 Zvláštní úvahy pro venkovní vedení

Ačkoliv se postup koordinace izolace pro venkovní vedení řídí obecnou filozofií koordinace izolace, musí se brát v úvahu následující zvláštnosti:

- když návrh obsahuje volně kývající izolátory, do elektrické pevnosti vzdušných vzdáleností musí být zahrnut pohyb vodičů;
- normy pro izolátory stanoví rozměry izolátorových článků bez odkazu na nejvyšší napětí pro zařízení nebo nejvyšší napětí sítě. Následkem toho končí postup koordinace izolace stanovením požadovaného výdržného napětí U_{rw} . Výběr jmenovitého napětí z řady v IEC 71-1 není nutný a tabulky 2 a 3 v IEC 71-1 neplatí;
- chování izolace venkovních vedení má velký dopad na chování izolace stanic. Četnost výpadků přenosových vedení a četnost atmosférických přepětí blízko stanice určují četnost přepětí s rychlým čelem vstupujících do stanice.^[10]

4.10.1 Koordinace izolace pro provozní napětí a dočasná přepětí

Provozní napětí a dočasná přepětí určují nezbytnou délku izolátorového řetězce a tvar izolátorového článku pro intenzitu místního znečištění. V sítích s přímo uzemněným středem s činitelem zemního spojení 1,3 a méně obvykle postačuje navrhnout izolátory tak, aby vydržely nejvyšší napětí sítě fáze-zem. Pro vyšší činitele zemního spojení, a zvláště v sítích s izolovaným nebo rezonančně uzemněným středem, se musí uvažovat dočasná přepětí.

Kde se musí uvažovat volně kývající izolátory, vzdálenosti mají být určeny pro krajní podmínky kývání.^[10]

4.10.2 Koordinace izolace pro přepětí s pomalým čelem

Přepětí s pomalým čelem důležitá pro venkovní vedení jsou přepětí při zemním spojení, přepětí při zapínání a při opětovném zapínání. Při určování přijatelné poruchovosti se má vzít v úvahu, že:

- porucha izolace vyvolaná přepětím při zemním spojení vyvolává dvojité zemní spojení;
- porucha izolace vyvolaná přepětím při opětovném zapínání způsobí neúspěšnost zapnutí.^[10]

4.10.3 Přepětí při zemním spojení

Přepětí při zemním spojení se má uvažovat v sítích s vysokým činitelem zemního spojení, tj. pro distribuční nebo přenosové vedení v sítích s rezonančně uzemněným středem. Přijatelná poruchovost pro tato vedení se volí řádově rovna jejich poruchovosti při dvojfázových atmosférických přepětích. Jako vodítko jsou typické poruchovosti mezi 0,1 a 1,0 přeskočů za rok.

Zvláštní úvahy jsou nutné pro vedení v rozsahu II, v nichž jsou přepětí při zapínání a opětovném zapínání normálně udržována na nízkých hodnotách, jelikož přepětí s pomalým čelem způsobené zemním spojením může být v tomto případě nebezpečnější.^[9]

4.10.4 Přepětí při zapínání a opětném zapínání

Zapínací přepětí jsou důležitá pro všechna venkovní vedení, avšak v rozsahu II. Přijatelné vhodné poruchovosti jsou řádově 0,005-0,05 přeskoků za rok.

Přepětí při opětném zapínání zasluhují pozornost u trojfázových vedení, když se užívá trojfázové opětné zapínání (vlivem zbytkového náboje). Přijatelná vhodná poruchovost je 0,005-0,05 přeskoků za rok.

Přepětí při opětném zapínání se nemusí uvažovat, používá-li se jednofázové opětné zapínání na přenosových vedeních nebo distribučních vedeních, v nichž zůstávají během manipulace distribuční transformátory připojené.

Přepětí s pomalým čelem jsou jedním z faktorů určujících vzdušné vzdálenosti a u některých typů izolátorů také izolátorové armatury. Jejich důležitost je obvykle omezena na přenosová vedení v oboru nejvyšších síťových napětí 123 kV a vyšších. Kde se používají volně kývající izolátory, obvykle se určují vzdušné vzdálenosti pro přepětí s pomalým čelem za předpokladu mírných (středních) kyvů. Pro distribuční vedení jsou vzdálenosti obecně určovány izolátorem a přepětí s pomalým čelem se neuvažují.^[10]

5 Principy a pravidla při modelování přepětí

Pro účely této diplomové práce se jeví jako nejvhodnější software pro simulaci program ATP-EMTP. Tento software umožňuje simulaci přechodových dějů se zaměřením na elektromagnetické děje. Součástí balíčku je grafický procesor ATPDraw, který slouží pro tvorbu modelů simulovaných sítí. K zobrazování výsledků slouží PlotXY. Jednoduchý program k zobrazování výsledků simulací a grafů.

Práce spočívá v nakreslení elektrického schématu a zadání vlastních hodnot v jednotlivých modelech prvků obvodu. Vypočtené výsledky je pak možno prohlížet, například v programu PlotXY.

5.1 ATP-EMTP

V problematice koordinace izolace je nutné si ověřit, naše vypočtené výsledky. Model obsahuje zdroj 66 kV, vedení a transformátor. Zadané hodnoty odpovídají štítkovým hodnotám konkrétních zařízení, nebo parametrů vedení. V reálném provedení jsou instalovány tři transformátory. Pro simulaci budeme počítat s **nejhorší** možnou situací. Model tedy zahrnuje použití jen jednoho transformátoru a úder blesku do fázového vodiče nejbližší transformátoru. Nejbližší možný bod na vedení je 300 metrů od transformátoru. Úkolem je ověřit působení omezovače přepětí v síti 66 kV. Další krok je návrh vhodné ochranné vzdálenosti L (m) a zjistit vliv délky přívodu **a** a **b** na přepětí.^[12]

5.1.1 Zdroj

Uvažujeme zdroj napětí v soustavě 66 kV. Pro nastavení parametru zdroje, je třeba znát velikost amplitudy a frekvenci.^[13]

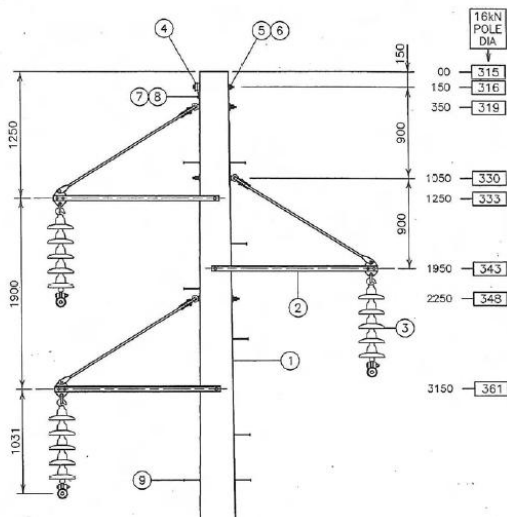
$$U_{max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \frac{66}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 53,88 \text{ kV}$$

Je použitý model s nastavením pro tři fázový zdroj napětí *ACSOURCE*.

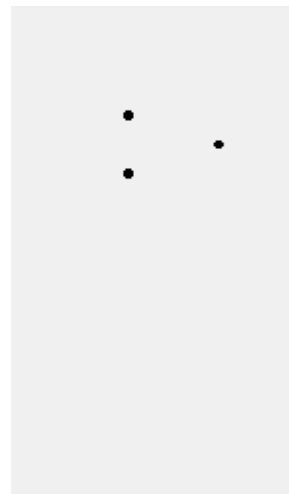
Amplituda	53888,77	<i>Volt</i>
Frequency	50	<i>Hz</i>
PhaseAngle	0	<i>degrees</i>
StartA	-1	<i>s</i>
StopA	100	<i>s</i>

5.1.2 Venkovní vedení a jejich modely

Pro simulaci bylo použito vzdušné vedení AlFe6 185 mm², které má parametry nejbližže skutečnému vedení v síti. Rozmístění vodičů bylo namodelováno dle skutečného provedení.

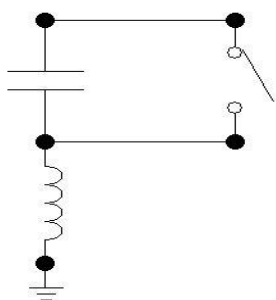


Obrázek 5-1 Model uspořádání vodičů



Obrázek 5-2 Model v ATP

Součástí modelu jsou zpětné přeskoky na vedení, jako následek překročení izolační pevnosti vedení, při postupu přepětové vlny z místa úderu blesku. Místa, ve kterých ke zpětnému přeskoku dochází, jsou izolátory. Ty nesou fázové vodiče, a díky tomu je proud bleskového výboje zčásti odveden stožárem do země a přepětová vlna je ztlumena. Hodnota indukčnosti stožáru je volena 1 μH na metr délky stožáru. Odpor uzemnění je velmi kolísavou hodnotou 5-30 Ω. Hodnoty $U_{50\%}$ udává norma [10]. Představuje napětově řízený spínač simulující napětí přeskoku, které odpovídá polovině přeskokového napětí izolátoru.



Obrázek 5-3 Model izolátoru

Dalším parametrem je měrná rezistivita země, která byla volena 100 Ω/m.

5.1.3 Bleskojistka

Jako ochrana je v síti použita bleskojistka firmy ABB typ: PEXLIM Q 72-58 s parametry

$$U_r = 72 \text{ kV}$$

$$U_c (\text{MCOV}) = 58 \text{ kV}$$

$$I_n = 10 \text{ kA}$$

Proud je dán závislostí $i = p \cdot \left(\frac{u}{v_{ref}} \right)^q$, kde se konstanty p a q vypočítají automaticky po zadání VA charakteristiky.^[13]

Z katalogového listu jsou použity tyto hodnoty:

Tabulka 5-1 VA charakteristika omezovače přepětí

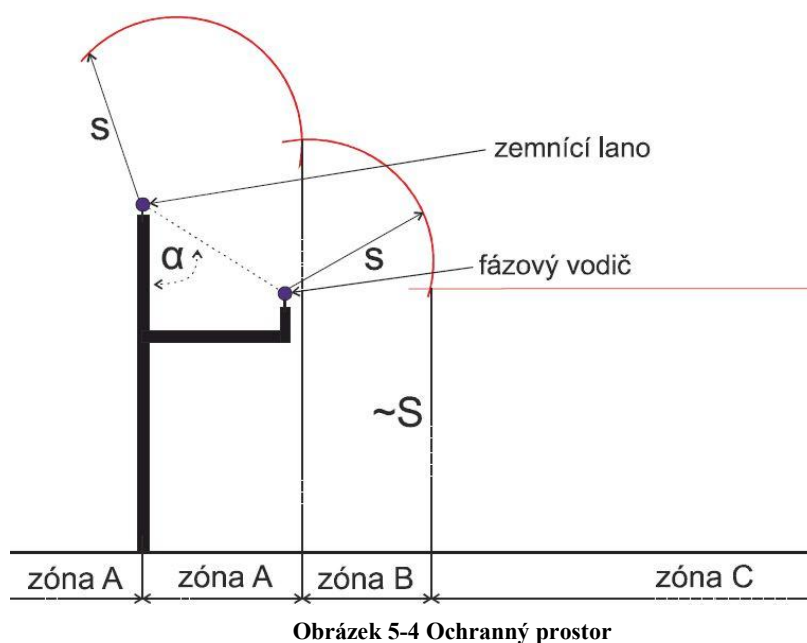
$I [\text{A}]$	$U [\text{V}]$
5000	161000
10000	170000
20000	187000
40000	209000

5.1.4 Bleskový proud

Simulace bleskového proudu se provádí pomocí modelu ATP HEIDLER. Blesk, který udeří do fázového vodiče, může mít vrcholovou hodnotu až 7 kA. Hodnota je počítána pro nejvýše usazený vodič. Pro nižší vodiče je proud menší. Uvažujeme nejhorší případ.

$$I_s = \left(\frac{1,4925 \cdot d}{H^{0,6} - y^{0,6}} \right)^{1,351}$$

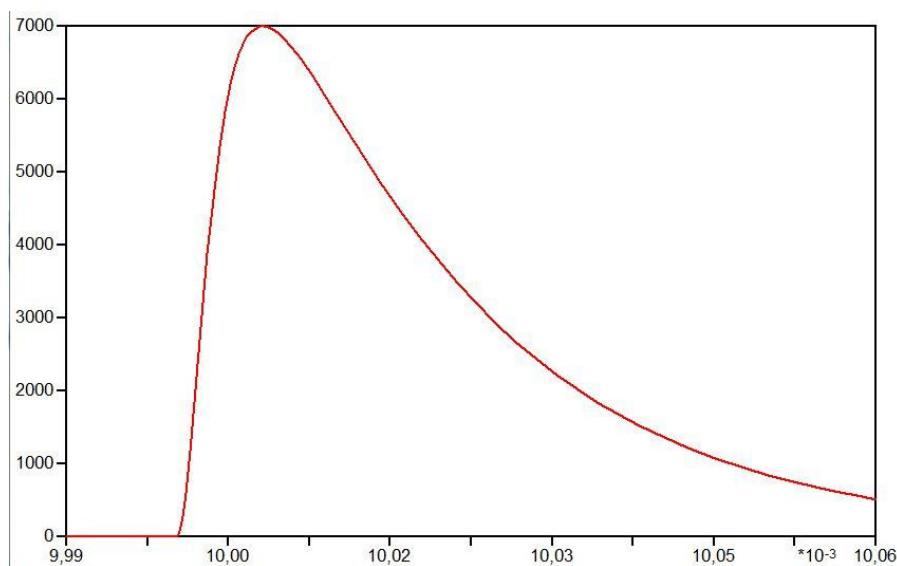
- H průměrná výška zemnicího lana
- y průměrná výška fázového vodiče
- d krajní vzdálenost k zemnicímu lanu



Na obrázku je názorná ukázka konstrukce ochranných prostor pro soustavu se zemnicím lanem. Poloha zemnicího lana nad fázovým vodičem je dána ochranným úhlem α ($25^\circ \div 30^\circ$). Ochranná vzdálenost je poloměr ochranného prostoru, jehož střed leží v místě vzniku vstřícného výboje a je obvykle totožný s nejvyšším bodem daného objektu. Velikost ochranné vzdálenosti S je dána vztahem:

$$S = 10 \cdot I^{\frac{2}{3}}$$

- zóna A** blesk pravděpodobně zasáhne zemní lano
zóna B blesk pravděpodobně zasáhne fázový vodič



Obrázek 5-5 Bleskový proud

5.1.5 Transformátor

V síti, kde aplikujeme koordinaci izolace, jsou instalovány dva totožné transformátory. Pro modelování budeme počítat jen s jedním. Takto bude simulován nejvíce nepříznivý stav. Na druhém transformátoru může probíhat údržba nebo být odstávka.

Model v ATP BCTRAN je nastaven jako skutečný transformátor ABB 66/11 kV, 30/40MVA D-Y

Structure		Ratings	
Number of phases	3	HV	LV
Number of windings	2	L-L voltage [kV]	66 11
Type of core	Other	Power [MVA]	30 40
Test frequency [Hz]	50	Connections	D Y
<input type="checkbox"/> AR Output		Phase shift [deg]	30
		<input type="checkbox"/> Ext. neutral connections	

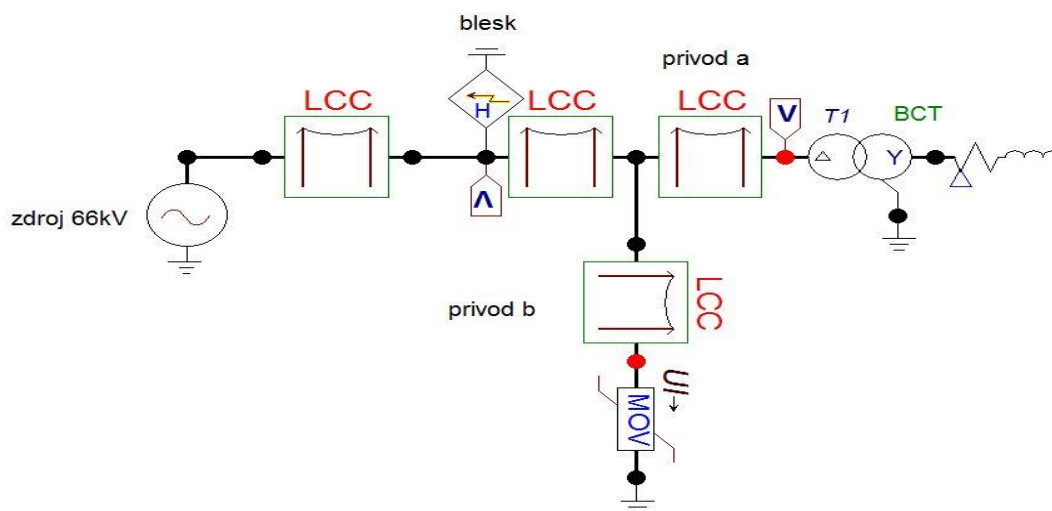
Obrázek 5-6 Nastavení transformátoru

5.1.6 Nastavení simulace

Zásadu pro každou simulaci je nastavení její doby a krok výpočtu. Tyto hodnoty jsou nastaveny: krok výpočtu 1 μ s a simulaci 0-1 s.

5.1.7 Výsledek modelování

Celkové schéma sítě vypadá následovně:



Obrázek 5-7 Schéma sítě v ATP

Měření se provádí v místě úderu blesku, na omezovači přepětí a primární straně transformátoru.

6 Aplikace koordinace izolace a stanovení reprezentativních přepětí na reálnou síť

Analyzovaná síť se nachází v Australii ve státě Queensland. Jedná se o průmyslovou síť 66 kV, která slouží pro přenos energie v lokalitě, kde se těží uhlí. Síť je zakončena transformátorem 66/11 kV.

Koordinaci izolace budeme provádět na úsek 66 kV podle normy ČSN EN 600071-2. Výpočty jsou prováděny v programu, který je ve formátu Excel a je součástí této diplomové práce. Postup je stanoven normou podle obrázku 4-3.

Základní údaje sítě:

- nejvyšší síťové napětí $U_s = 72,5$ kV
- stupeň znečištění IV (velmi těžké)
- nadmořská výška $H = 250$ m. n. M

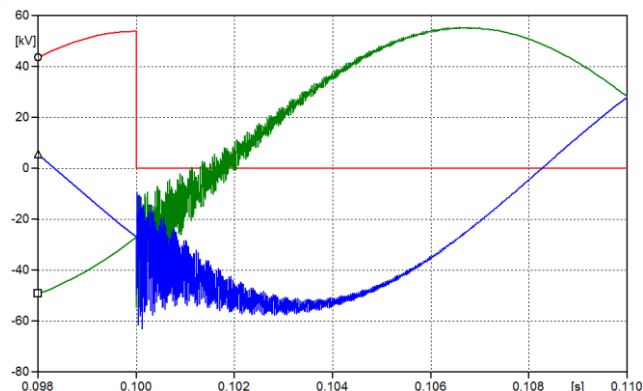
6.1 Stanovení reprezentativních přepětí U_{rp}

Pro koordinaci izolace je nejdůležitější vztažné napětí, tj. maximální trvalé provozní napětí U_s . Pro námi analyzovanou síť se jmenovitým napětím 66kV bylo potvrzeno napětí $U_s = 72,5$ kV. Instalovaná zařízení musí mít U_m rovno U_s nebo vyšší.

Síť a transformátor se nachází v prostředí s velmi velkým faktorem znečištění. Vzhledem k tomuto prostředí budou požadavky na chování vnější izolace při střídavém napětí splněny předepsáním zkoušky při umělém znečištění odpovídajícímu stupni znečištění IV. Podle tabulky v normě je doporučena minimální povrchová dráha pro izolátory 31 mm/kV.

6.1.1 Dočasná přepětí

Jedním ze zdrojů dočasných přepětí jsou **zemní spojení** vyvolávající přepětí fáze-zem. Je to nejčastější porucha v sítích s nadzemním vedením. Vzhledem k uzemnění sítě a poměru reaktancí sítě X_0/X_1 (cca 1) přepětí nedosahuje vysokých hodnot. Po odstranění poruchy přepětí zmizí. V programu ATP je simulována situace zemního spojení v čase 0,1 s. Dle grafu jde vidět, že indukované přepětí na ostatních fázích naroste na maximální hodnotu 58 kV.



Obrázek 6-1 Zemní spojení

Pro výpočet z normy můžeme stanovit koeficient zemního spojení $k = 1,5$. Je to hodnota pro nejhorší možný scénář.

Odpovídající reprezentativní přepětí fáze-zem při zemním spojení je tedy $U_{rp} = 63$ kV.

Hodnoty pro výpočet reprezentativního přepětí a simulace přepětí pro zemní spojení jsou přibližně stejné.

Dalším zdrojem dočasných přepětí je **ztráta zatížení**, která je zdrojem přepětí postihujících izolaci fáze-fáze i fáze-zem. Ztráta zatížení může způsobit dočasná přepětí v případě relativně slabých zdrojů s vysokou zátěží. Nejhorší případ je v místě sítě s nejmenším zkratovým výkonem. Transformátor T1 má maximální zátěž 30MW při účinnosti 0,9.

Potom se může napětí zvýšit při ztrátě zatížení podle:

$$K_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{Q_L}{S_{SC}}\right)^2 + \left(\frac{P_L}{S_{SC}}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{14,5}{423}\right)^2 + \left(\frac{30}{423}\right)^2} = 1,037 \text{ p.j.}$$

P_L zátěž, Q_L reaktance zátěže, S_{SC} minimální zkratový výkon.

Výsledná hodnota je absolutně nekritická.

Při jiných poměrech v síti může dojít v nejhorších případech až k přepětí 1,4 p.j.

Výpočtem dle normy je tato hodnota stanovena na:

fáze-zem $U_{rp} = 58,6$ kV

fáze-fáze $U_{rp} = 101,5$ kV

Tyto hodnoty jsou stále pod hranicí BIL (350 kV).

6.1.2 Přepětí s pomalým čelem

Opětne zapnutí vedení, může vést k přepětí na otevřeném vstupu do rozvodny $u_{e2} = 3,0$ p.j. a $u_{p2} = 4,5$ p.j.^[10]

Reprezentativní přepětí pro zařízení na výstupu z vedení jsou:

$$\begin{aligned} u_{et} &= 1,25 u_{e2} - 0,25 & u_{et} &= \mathbf{207 \text{ kV}} \\ u_{pt} &= 1,25 u_{p2} - 0,43 & u_{pt} &= \mathbf{307 \text{ kV}} \end{aligned}$$

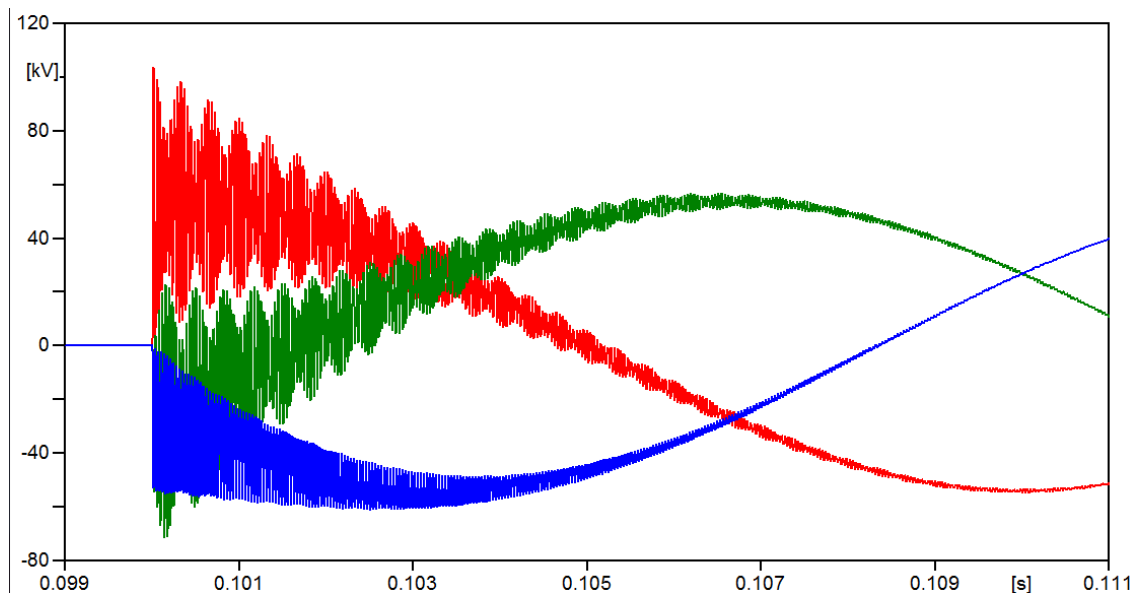
Přepětí v místě manipulace jsou však mnohem nižší než na konci vzdáleném.

Síťové studie udávají $u_{e2} = 1,9$ p.j. a $u_{p2} = 2,9$ p.j.

$$u_{et} = \mathbf{126 \text{ kV}}$$

$$u_{pt} = \mathbf{189 \text{ kV}}$$

V simulaci ATP, kde jsou nastaveny hodnoty nejbližší skutečným, je výsledek patrný na obrázku. V čase 0,1 sekund se zapne vedení a vznikne přepětí.



Hodnoty jsou nižší než vypočtené a stále pod hranicí BIL (350 kV).

6.1.3 Přepětí s rychlým čelem

Uvažuje se jen atmosférické přepětí. Norma používá zjednodušený statistický přístup, který vede přímo ke koordinačnímu výdržnému napětí, aniž by se určovalo reprezentativní přepětí.

Pro naši síť máme stanovené hodnoty:

četnost výpadků

$R_a = 1$ za 400 let

počet vedení vstupujících do stanice

$n = 1$

Maximální vzdálenost je pro vnitřní izolaci 6,8 metrů; pro vnější izolaci 14 m. Činitel vedení $A = 4500$ a s délkou pole 300 m.

$$\text{Náhradní délka vedení } L_a = \frac{Ra}{Rkm} = \frac{2,5}{0,001} = 250 \text{ m}$$

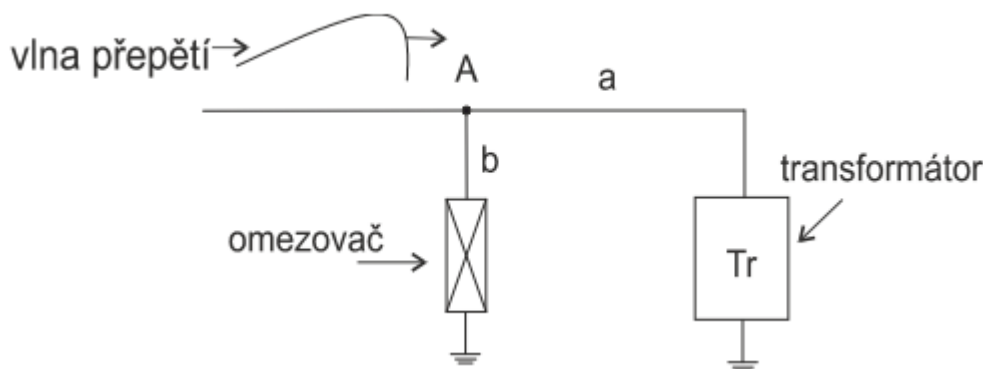
Koordinační výdržná napětí

$$\text{pro vnitřní izolaci: } U_{CW} = U_{PL} + \frac{A}{n} \cdot \frac{L}{L_{sp} + L_a} = 72 + \frac{4500}{1} \cdot \frac{6,7}{300 + 250} = 113 \text{ kV}$$

$$\text{pro vnější izolaci: } U_{CW} = U_{PL} + \frac{A}{n} \cdot \frac{L}{L_{sp} + L_a} = 72 + \frac{4500}{1} \cdot \frac{14}{300 + 250} = 172 \text{ kV}$$

6.1.4 Simulace přepětí s rychlým čelem

Amplituda bleskového proudu je vypočtena na hodnotu 7 kA. Při simulování uvažujeme, že blesk udeří přímo do fázového vodiče. Pro zjednodušení modelu uvažujeme vzdálenosti, od omezovače přepětí a transformátoru k zemi jako nulové. Vzdálenost úderu blesku do vedení nastane ve vzdálenosti 300 metrů od bodu A.



Obrázek 6-3 Zapojení omezovače přepětí

Základní izolační hladina BIL (Basic Insulation Level) udává maximální hodnotu napětí, kterému zařízení odolává. Pro síť 66 kV udává norma [10] hodnotu 325 kV.

Při úderu blesku do fázového vodiče přichází přepětí vlna se strmostí S . Na svodiči roste napětí až do hodnoty U_p (zbytkové napětí svodiče) a dále se nemění. Po příchodu na svodič dojde k odrazu a do místa A se šíří zpětná vlna. Vlny superponují (vznik nižšího napětí). Superponované napětí je podstatné pro určení hodnoty ochranné vzdálenosti L .^[12]

$$\frac{BIL}{2 \cdot L + x} = \frac{U_p}{x}$$

x je vzdálenost, kterou musí přepětí vlna urazit za čas k dosažení napětí U_p .

$$x = \frac{U_p}{S} \cdot v$$

v je rychlost vlny, která se šíří rychlostí světla.

Dosažením dostaneme vztah

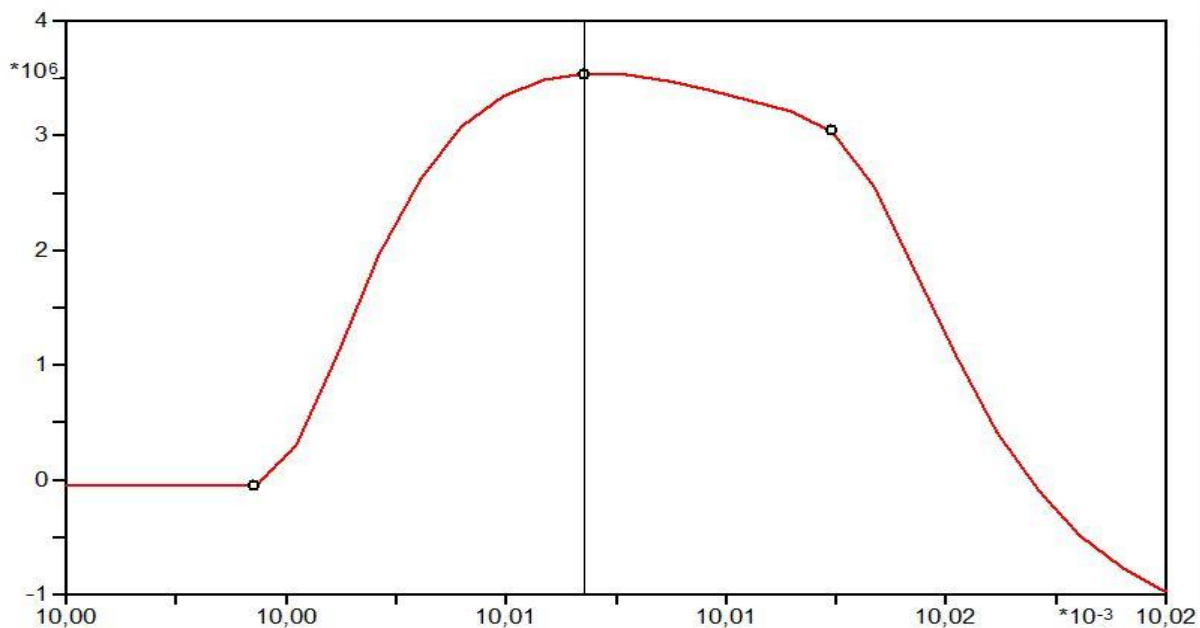
$$L = v \cdot \frac{(BIL - U_p)}{2 \cdot S}$$

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left(\frac{BIL}{K_s} - U_p \right)$$

Aby se hodnota blížila skutečnému stavu, je nutnost brát v úvahu bezpečnostní koeficient K_s . Ten se udává pro naši aplikaci (venkovní použití) $K_s=1,2$.^[10]

6.2 Ochranná vzdálenost

Blesk udeří v čase 0,01 sekund a za 8 μs naroste na maximální hodnotu $U_{\text{MAX}} = 3541 \text{ kV}$. Na omezovač přepětí přichází přepětí vlna se strmostí S . Ten propustí pouze napětí o velikosti U_p (zbytkové napětí svodiče), které putuje dále po vedení. Zbytek napětí je odražen zpět. Odražená a přicházející vlna spolu superponují a vzniká nižší napětí. Superponované napětí je rozhodující pro volbu velikosti ochranné vzdálenosti L (m).



Obrázek 6-4 Přepětí v místě úderu

Strmost se vypočte:

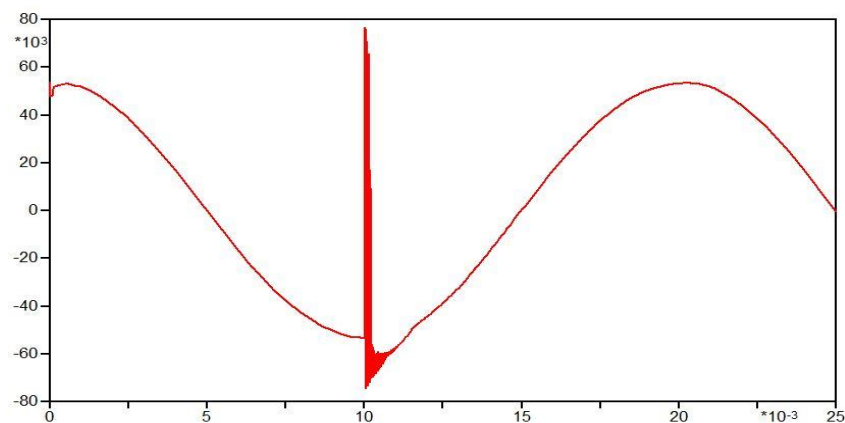
$$S = \frac{U_{\text{max}}}{t_{\text{max}}} = \frac{3541}{8} = 443 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Ochranná vzdálenost L

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left(\frac{BIL}{K_S} - U_p \right) = \frac{300}{2 \cdot 443} \cdot \left(\frac{325}{1,2} - 72 \right) = 6,7 \text{ metrů}$$

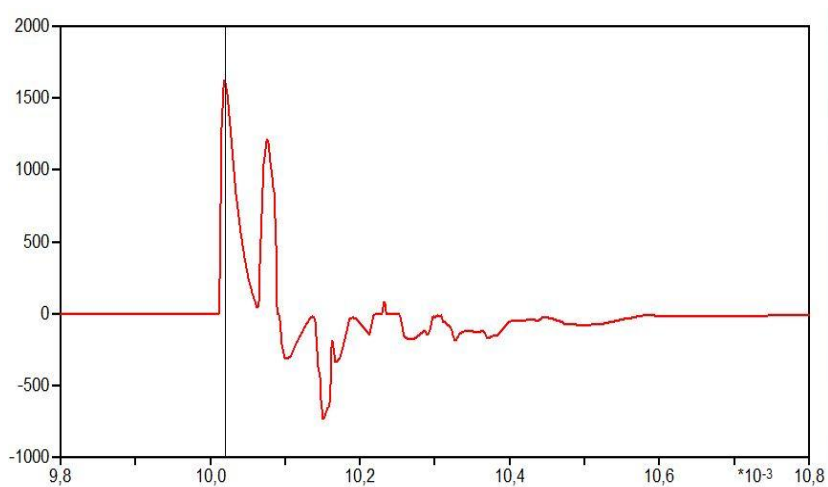
6.2.1 Simulace na omezovači přepětí

Bleskojistka se během simulace jeví jako ideální (reaguje okamžitě na příchod přepět'ové vlny). Pro tuto simulaci jsme omezovač přepětí umístili na mez vypočtené ochranné vzdálenosti $L = 6,7$ metrů.



Obrázek 6-5 Napětí na omezovači přepětí

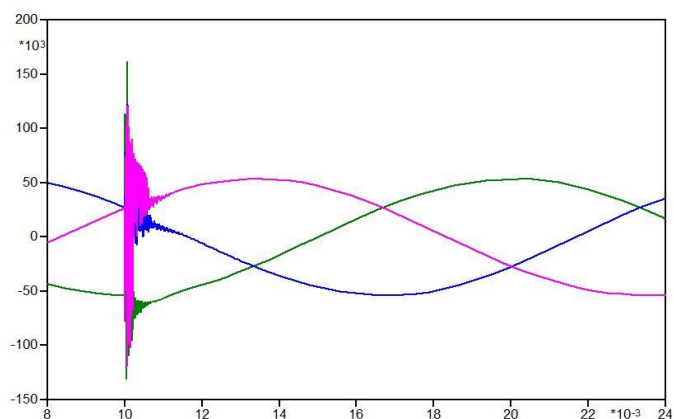
Z obrázku je patrné, že na fázi LI bylo napětí se sinusovým průběhem. Následně v čase 10ms udeřil blesk a vzniklo přepětí. Maximální hodnota U_{max} je na ochraně 77 kV. Napětí tedy nepřesáhne mez BIL.



Obrázek 6-6 Proud na omezovači přepětí

Svodičem neprotéká žádný proud až do okamžiku úderu blesku. V okamžiku, kdy udeří blesk, začne protékat svodičem impulsní proud s velkou strmostí nárůstu.

Napětí na primární straně transformátoru

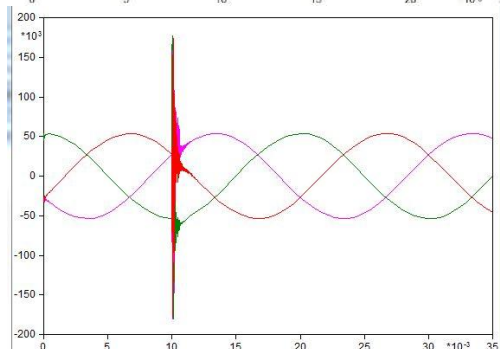
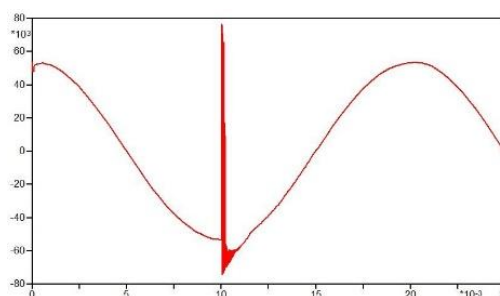
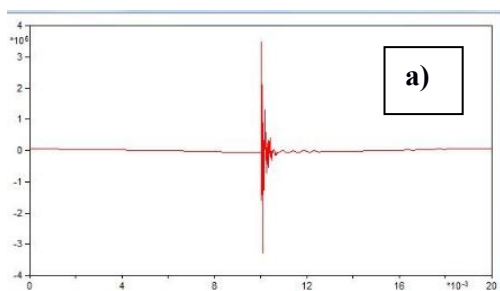


Obrázek 6-7 Napětí na primární straně transformátoru

Z obrázku je patrné, že na fázích bylo napětí se sinusovým průběhem. Následně v čase 10 ms udeřil blesk a vzniklo přepětí. Maximální hodnota je na první fázi transformátoru $U_{MAX} = 161$ kV. Napětí tedy nepřesáhne stanovenou mez. Indukovaná napětí na ostatních fázích jsou menších hodnot.

Souhrn simulace:

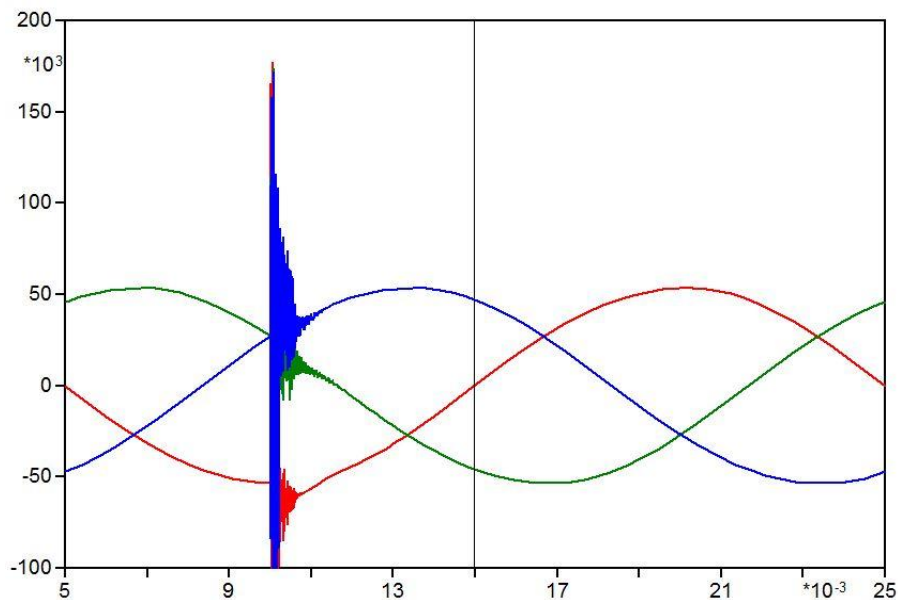
Strmost vstupující vlny přepětí je snižována hlavně tlumícím účinkem koróny na venkovním vedení. To znamená, že strmost vstupující vlny může způsobit určitou vrcholovou hodnotu přepětí jen tehdy, jestliže blesk udeří do venkovního vedení uvnitř jisté vzdálenosti od stanice. U vzdálenějších úderů je strmost příliš malá.



Obrázek 6-8 Souhrn simulace a) místo úderu b) napětí na omezovači přepětí c) napětí na transformátoru

6.2.2 Vliv délky přívodu a a b

Prozatím byla stanovena délka 6,7 metrů, při které se objeví na transformátoru napětí 161 kV. Změnou délky na 10 metrů se nám projeví zvětšení napětí. Při větší délce přívodního vedení se díky indukci zvětší přepětí na hodnotu 170 kV.



Obrázek 6-9 Přepětí na primární straně transformátoru

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou přepětí v sítích a přiřadit je do kategorií dle ČSN EN 60071, nalézt příčiny a aplikovat ochranu proti nežádoucím přepět'ovým jevům.

Práce se v první kapitole podrobněji zabývá druhy přepětí, jejich příčinou a problematikou. Definují různé druhy přepětí podle aktuálně platných norem a předpisů. Podstatná je kapitola zabývající se výdržným napětím. Tento termín je v práci mnohokrát zmiňován v souvislosti s koordinací izolace.

Další kapitola se podrobněji zabývá jedním druhem přepětí, a to atmosférickým. Je zde definován bleskový proud a jeho důsledky na elektrizační soustavu. Nejhorší situace, která může v síti nastat, je právě přímý úder blesku do fázového vodiče. Z výpočtu je patrné, že maximální hodnota bleskového proudu, který může udeřit do fázového vodiče, se rovna 7 kA. Blesk s proudem vyšším než 7 kA, udeří do zemnicího lana, nebo stožáru. Tento případ není v této diplomové práci simulován.

Vzniklé přepětí při zásahu fázového vodiče, je simulován v programu ATP a demonstrován na reálné síti ležící v Austrálii. Kapitola hlavně představuje vliv zemnicího lana na případný úder do sítě. Pravděpodobnost úderu blesku do zemnicího lana je mnohokrát větší, stejně jako hodnoty těchto proudů.

Celá problematika přepětí v elektroenergetice se uvádí v praxi jako koordinace izolace. Pro tohle je stanovena konkrétní norma ČSN EN 60071, o níž pojednává následující kapitola, která představuje metodiku při postupu určování koordinace izolace, principy a navrhuje opatření. Pro tyto výpočty byl vytvořen výpočetní program v Excelu, který počítá hodnoty, které norma požaduje. Soubor je součástí přílohy této práce.

Úkolem bylo primárně zjistit bezpečnostní vzdálenost pro chráněný transformátor. Ta byla vypočtena na hodnotu 6,7 metrů. Výpočet se stanovil na základě výsledků simulace úderu bleskového proudu do fázového vodiče, jakožto nejhorší možný případ. V této vzdálenosti musí být instalována bleskojistka tak, aby účinně chránila daný transformátor proti přepětí, převážně atmosférickým.

Výsledky simulace nám říkají, že délky přívodu od omezovače přepětí k transformátoru, mají podstatný vliv na velikost přepětí, které se může objevit na svorkách primárního vynutí transformátoru. Závěrem můžeme konstatovat, že délky by měly být co nejkratší, a neměla by se překračovat vypočtená vzdálenost L . Pro každý druh přepětí je vypočtena předpokládaná hodnota přepětí, a ta je srovnána s parametrem BIL.

Významný vliv na velikost přepětí a bleskového proudu je uzemnění stožáru. Platí pravidlo, že čím je hodnota uzemnění menší, tím dokáže stožár svést do země více elektrické energie. Další způsob omezení velikosti bleskového proudu je použití stínicího lana na vrcholu stožáru. Lano chrání fázové vodiče pod definovaným úhlem a umí zachytit největší bleskové proudy. V našem případě více jak 7 kA.

Studie sítě podle normy prokázala správnost instalace omezovače přepětí a transformátoru v reálné síti. Žádná hodnota nepřekročí předepsanou hodnotu BIL.

8 Seznam použité a citované literatury

- [1] ČSN EN 62305-1 ed. 2: 2011. Ochrana před bleskem. Část 1: Obecné principy. Český normalizační institut
- [2] BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3
- [3] KUTÁČ, Jiří a Ján MERAVÝ. *Ochrana před bleskem a přepětím z pohledu soudních znalců: Ochrana pred bleskom a prepätím z pohľadu súdnych znalcov*. Praha: [s.n.], 2010. ISBN 978-80-7385-081-4
- [4] HASMAN, Tomáš. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01699-4
- [5] Tomáš Jaroš: Ochrany energetických sítí proti přepětí, ZČU v Plzni 2010
- [6] Milan Bureš. Koordinace izolace elektrických zařízení nízkého napětí Document *elektrika.cz*. [online]. 25.11.2016 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/kiapb021204/view>
- [7] KLIMŠA, David. *Vnější a vnitřní ochrana před bleskem*. Praha: IN-EL, 2009. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-86230-48-1
- [8] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8
- [9] ČSN EN 60071-1 ed. 2: 2006. Koordinace izolace. Část 1: Definice, principy a pravidla. Český normalizační institut
- [10] ČSN EN 60071-2: 2000. Koordinace izolace. Část 2: Pravidla pro použití. Český normalizační institut
- [11] ČSN EN 60099-5: 1999. Svodiče přepětí. Část 5: Doporučení pro volbu a použití. Český normalizační institut
- [12] SVAČINA, Tomáš. *Atmosférické výboje a jejich dopad na elektrická zařízení*, 2012
- [13] MACH, Věslav. WEB <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
- [14] ČSN EN 60060-1: 2011. Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
- [15] ČSN EN 62305-2 ed. 2: 2011. Ochrana před bleskem. Část 2: Řízení rizika. Český normalizační institut
- [16] PNE 33 0000-8, Navrhování a umísťování svodičů přepětí v distribučních sítích nad 1 kV do 45 kV, ÚJV Řež, Praha, 2005
- [17] Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Line, CIGRE Brochure 63